BULLETIN

DE LA SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY

NANCY, IMPRIMERIE BERGER-LEVRAULT ET Cie.

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ DES SCIENCES

DE NANCY

ANCIENNE SOCIÉTÉ DES SCIENCES NATURELLES DE STRASBOURG

FONDÉE EN 1828

Série II. — Tome VII. — Fascicule XVIII

18e ANNÉE. — 1885

(AVEC PLANCHES ET FIGURES INTERCALÉES DANS LE TEXTE)

PARIS

BERGER-LEVRAULT ET Cie, LIBRAIRES-ÉDITEURS

5, Rue des Beaux-Arts, 5

MÊME MAISON A NANCY

1886

SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY

BUREAU ET CONSEIL D'ADMINISTRATION

POUR L'ANNÉE 1885.

		MM.
Bureau	*Président,*	Floquet.
	Vice-président,	Schlagdenhauffen.
	Secrétaire général,	Hecht.
	Secrétaire annuel,	Thouvenin.
	Trésorier,	Friant.
Administrateurs.		Fliche.
		Beaunis.
		Charpentier.

LISTE DES MEMBRES

COMPOSANT LA SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY

Arrêtée au 1er janvier 1885.

I. MEMBRES TITULAIRES

INSCRITS PAR RANG D'ANCIENNETÉ.

1. Jacquemin ✻, directeur de l'École supérieure de pharmacie. 3 février 1857.
2. Dr Schlagdenhauffen, professeur à l'École supérieure de pharmacie. 5 juillet 1859.
3. Bach ✻, doyen honoraire de la Faculté des sciences. 9 janv. 1861.
4. Dr Hecht, professeur à la Faculté de médecine. 3 janvier 1865.
5. Dr Feltz ✻, professeur à la Faculté de médecine. 7 février 1865.
6. Dr Gross, professeur à la Faculté de médecine. 16 décembre 1868.
7. Dr Bleicher ✻, professeur à l'École supérieure de pharmacie. 7 juillet 1869.
8. Dr Beaunis ✻, professeur à la Faculté de médecine. 5 mai 1873.
9. Dr Bernheim, professeur à la Faculté de médecine. 5 mai 1873.

10. Dr Marchal, ancien chef de clinique à la Faculté de médecine. 5 mai 1873.
11. Dr Spillmann, professeur agrégé à la Faculté de médecine. 5 mai 1873.
12. Humbert, docteur en médecine. 30 juin 1873.
13. Delcominète, professeur suppl. à l'École supérieure de pharmacie. 5 janvier 1874.
14. Dr Friant, professeur à la Faculté des sciences. 19 janvier 1874.
15. Roussel, ancien professeur à l'École forestière. 16 mars 1874.
16. Fliche, professeur à l'École forestière 20 avril 1874.
17. Dr Lallement, professeur à la Faculté de médecine. 26 avril 1875.
18. Haller, professeur à la Faculté des sciences. 8 janv. 1877.
19. Bichat, professeur à la Faculté des sciences. 22 janvier 1877.
20. Dr Coze ✻, professeur à la Faculté de médecine. 7 mai 1877.
21. Le Monnier, professeur à la Faculté des sciences. 18 juin 1877.
22. Monal, pharmacien de 1re classe. 2 décembre 1878.
23. Gault, pharmacien de 1re classe. 6 janvier 1879.
24. Wohlgemuth, maître de conférences à la Faculté des sciences. 20 janvier 1879.
25. Lécuyer, pharmacien de 1re classe. 20 janvier 1879.
26. Dr Charpentier, profess. à la Faculté de médecine. 2 mars 1879.
27. Godfrin, prof. à l'École sup. de pharmacie. 24 novembre 1879.
28. Floquet, professeur à la Faculté des sciences. 19 janvier 1880.
29. Arth, licencié ès sciences physiques. 19 janvier 1880.
30. Dr Koehler, chargé d'un cours à la Faculté des sciences. 2 février 1880.
31. Dr Macé, professeur agr. à la Faculté de médecine. 1er mai 1880.
32. Dr Grandeau O✻, doyen de la Faculté des sciences. 15 juin 1880.
33. Dr Lemaire, licencié ès sciences naturelles. 15 juillet 1880.
34. Sadler, docteur en médecine. 1er décembre 1880.
35. Dumont, docteur en droit, chef des travaux physiques à la Faculté de médecine. 16 janvier 1881.
36. Kuntzmann, professeur au Lycée. 16 janvier 1881.
37. Jaquiné O✻, inspecteur général honoraire des ponts et chaussées. 16 janvier 1881.
38. Dr Garnier, prof. agrégé à la Faculté de médecine. 2 mars 1881.
39. Dr Stoeber, ancien chef de clinique à la Faculté de médecine. 15 mars 1881.
40. Volmerange ✻, ingénieur en chef des ponts et chaussées en retraite. 15 mars 1881.
41. André, architecte. 1er mars 1882.
42. Blondlot, maître de confér. à la Faculté des sciences. 2 juin 1882.
43. Held, prof. agrégé à l'École supérieure de pharmacie. 2 juin 1882.
44. Henry, professeur à l'École forestière. 1er décembre 1882.

45. Dr Vuillemin, chef des travaux d'histoire naturelle médicale à la Faculté de médecine. 1er décembre 1882.
46. Thoulet, professeur à la Faculté des sciences. 17 janvier 1883.
47. Hasse, professeur à l'École normale d'instituteurs. 1er mars 1883.
48. Thouvenin, chef des travaux à l'École supérieure de pharmacie. 1er mars 1883.
49. Millot, ancien officier de marine, chargé d'un cours à la Faculté des sciences. 17 mai 1883.
50. A. de Metz-Noblat, homme de lettres. 3 juillet 1883.
51. Dr Bagnéris, professeur agrégé à la Faculté de médecine. 15 janvier 1884.
52. Brunotte, pharmacien de 1re classe. 15 février 1884.
53. Klobb, chef des travaux à l'École supérieure de pharmacie. 15 février 1884.
54. Laviéville, professeur au Lycée. 15 février 1884.
55. Gény, inspecteur adjoint des forêts. 15 mars 1884.
56. Chenu, licencié ès sciences naturelles. 18 juillet 1884.
57. Abbé Chevalier, licencié ès sciences, professeur à l'École Saint-Sigisbert. 1er décembre 1884.

II. MEMBRES ASSOCIÉS

INSCRITS PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE.

Berger-Levrault (Oscar) ✻, imprimeur à Nancy. 24 mars 1873.
Dupont, maître de forges à Pompey. 1er avril 1880.
Gaiffe, constructeur d'appareils de physique à Nancy. 28 janvier 1882.
Goudchaux, banquier à Nancy. 18 juin 1873.
Dr Herrgott ✻, professeur à la Faculté de médecine. 18 novembre 1878.
Heydenreich, ancien pharmacien à Strasbourg. 10 mars 1873.
Dr Heydenreich, professeur à la Faculté de médecine. 18 nov. 1878.
Houbre, ingénieur des ponts et chaussées à Nancy. 18 novembre 1878.
Laederich (Ch.), manufacturier à Épinal. 16 janvier 1874.
Lang (B.), manufacturier à Nancy. 16 mars 1880.
Lang (R.), manufacturier à Nancy. 16 mars 1880.
Dr Langlois, médecin en chef de l'Asile de Maréville. 16 janvier 1881.
Langenhagen (de), manufacturier à Nancy. 2 mars 1874.
Lederlin ✻, doyen de la Faculté de droit de Nancy. 24 mars 1873.
Dr Netter ✻, médecin principal de l'armée, en retraite. 2 août 1880.
Nœtinger (F.), à Nancy. 4 mars 1878.
Norberg (J.) ✻, imprimeur à Nancy. 24 mars 1873.
Dr Tourdes O ✻, doyen de la Faculté de méd. de Nancy. 1er juin 1880.
Viller, licencié en droit à Lunéville. 2 mars 1881.
Barthélemy, à Nancy. 17 mai 1883.

III. MEMBRES CORRESPONDANTS

A) NATIONAUX.

BABINET ✻, lieutenant-colonel d'artillerie à Poitiers. M. T. 5 nov. 1865.
BARDY, pharmacien de 1re classe à Saint-Dié. 15 novembre 1880.
BELLEVILLE, colonel en retraite, à Toulouse. 18 mai 1874.
Dr BŒCKEL (Eugène) ✻, prof. agr. à l'ancienne Faculté de médecine de Strasbourg, chirurgien en chef de l'hôpital civil. M. T. 19 mars 1867.
Dr BOUCHARD ✻, professeur à la Faculté de médecine de Bordeaux. M. T. 2 juin 1869.
BRILLOUIN, maître de conférences à la Faculté des sciences de Dijon. M. T. 16 janvier 1881. M. C. 15 novembre 1882.
Dr BOUISSON O ✻, ancien doyen de la Faculté de médecine de Montpellier. 14 août 1838.
BUCHINGER, ancien inspecteur de l'instruction primaire, à Strasbourg.
CASTAN ✻, chef d'escadron d'artillerie. M. T. 5 juin 1866; M. C. 5 juin 1867.
Dr CHRISTIAN, médecin en chef de la Maison nationale de Charenton. M. T. 22 janvier 1877.
Dr COLLIGNON, médecin-major de l'armée. M. T. 9 juin 1879; M. C. 15 novembre 1881.
DAUBRÉE C ✻, membre de l'Institut, inspecteur général des mines, professeur au Jardin des Plantes. M. A. 9 avril 1839; M. T. 5 avril 1842; M. C. août 1861.
Dr DELACROIX, inspecteur des eaux de Luxeuil. 9 juin 1868.
Dr ENGEL, professeur à la Faculté de médecine de Montpellier. M. T. 5 mai 1875.
Dr FAUDEL, secrétaire de la Société d'histoire naturelle de Colmar (Haut-Rhin). 8 mai 1867.
Dr FÉE ✻, médecin principal de l'armée. M. T. 19 février 1867.
FIESSINGER, docteur en médecine à Thaon (Vosges). 1er décembre 1881.
FLAMMARION (Camille), astronome et écrivain scientifique, à Paris. 4 novembre 1868.
FRANÇOIS (Jules), inspecteur général des mines, à Paris. 9 juin 1868.
GAY (J.), professeur au Lycée de Montpellier. M. T. 19 février 1867; M. C. 19 juillet 1871.
GRAD (Ch.), naturaliste, à Colmar (Haut-Rhin). 6 février 1869.
Dr HARO ✻, médecin principal de l'armée. M. T. 16 avril 1877; M. C. 3 janvier 1881.
HECKEL, prof. à la Faculté des sciences de Marseille. M. T. 21 fév. 1876.
HERRENSCHMIDT (E.), docteur en médecine à Strasbourg. 15 janv. 1867.
HIRSCH, ingénieur des ponts et chaussées, à Paris. M. T. 5 mai 1873.

HUGUENY ✻, professeur à la Faculté des sciences de Marseille. M. T. 5 juillet 1859 ; M. C. en 1878.

JOUAN, capitaine de vaisseau, à Cherbourg. 1er décembre 1863.

JOURDAIN, ancien professeur à la Faculté des sciences de Nancy, à Saint-Waast-la-Hogue (Manche). M. T. en 1877 ; M. C. 8 décembre 1879.

KELLER, ingénieur des mines, à Paris. 19 juillet 1871.

KLEIN, pharmacien à Strasbourg. M. T. 4 juillet 1865.

Dr KŒBERLÉ O ✻, professeur agrégé à l'ancienne Faculté de médecine de Strasbourg. M. T. 7 juillet 1857.

KOSSMANN, docteur ès sciences, à Nancy. 9 janvier 1866.

LADREY, prof. de chimie à la Faculté des sciences de Dijon. 3 mars 1863.

LEJEUNE, chef d'escadron d'état-major. 3 juillet 1860.

LEVALLOIS, ingénieur en chef des mines. 2 février 1830.

Dr LORTET (L.), doyen de la Faculté de médecine de Lyon. Déc. 1868.

MANGIN, professeur au Lycée Louis-le-Grand, à Paris. M. T. 24 novembre 1879 ; M. C. 15 novembre 1881.

Dr MILLARDET, professeur à la Faculté des sciences de Bordeaux. M. T. 5 mai 1869.

Dr MONOYER, prof. à la Faculté de méd. de Lyon. M. T. 4 juillet 1865.

MUNTZ, ingénieur des ponts et chaussées, à Nancy. M. T. 5 mai 1873.

OLRY, instituteur communal à Allain (Meurthe-et-Moselle). 5 juill. 1875.

PASTEUR C ✻, membre de l'Institut, professeur à la Sorbonne, ancien professeur à la Faculté des sciences de Strasbourg. M. T. 8 janvier 1850 ; M. C. 1854.

QUATREFAGES (A. de) O ✻, membre de l'Institut, professeur au Jardin des Plantes, à Paris. 2 juin 1835.

RŒDERER, ingénieur des ponts et chaussées. M. T. 5 mars 1877.

ROGER, pharmacien-major en retraite. M. T. 3 février 1857 ; M. C. 1er mars 1859.

SAINT-LOUP, prof. à la Faculté des sciences de Clermont-Ferrand. 15 janv. 1867.

WELTEN ✻, chef d'escadron d'artillerie en retraite.

Dr WIEGER, prof. à la Faculté de méd. de Strasbourg. M. T. 9 juin 1857.

Dr VILLEMIN ✻, professeur au Val-de-Grâce. 4 août 1857.

WILLEMIN O ✻, médecin-inspecteur adjoint des eaux de Vichy. M. T. 8 mai 1867 ; M. C. 19 juillet 1871.

WILLM, professeur à la Faculté des sciences de Lille. M. T. 8 mai 1867.

Dr ZEYSSOLFF, ancien médecin cantonal à Strasbourg. M. T. 15 avril 1834 ; M. C. 10 mars 1873.

B) ÉTRANGERS.

Allemagne.

BRUCH (Carl), professeur d'anatomie à Offenbach. 5 janvier 1864.

DECHEN, directeur général des mines à Bonn. 5 novembre 1850.

GEINITZ (H. B.), prof. à l'École polytechnique de Dresde. 5 fév. 1868.
LUDWIG, ingénieur civil à Darmstadt. 5 juillet 1859.
NÆGELI, professeur de botanique à l'Université de Munich. 7 mai 1855.
SANDBERGER, professeur à l'Université de Würzbourg. 4 août 1856.
SIEBOLD (Th. de), professeur à l'Université de Munich. 8 février 1848.

Amérique du Nord. (États-Unis.)

ASA-GRAY, professeur à l'Université de Boston. 2 décembre 1851.
LEA, membre de l'Académie de Philadelphie. 1er juillet 1856.
LESQUEREUX, naturaliste à Columbus. 5 novembre 1850.

Angleterre, Écosse, Irlande.

COLLINS (Matth.), professeur à Dublin. 2 juin 1869.
GOULD (John), membre de la Société royale de Londres. 8 février 1848.
HELLIER-BAILY, paléontologiste, membre de la Commission géologique de l'Irlande. 4 mars 1868.
MOORE (David), directeur du Jardin botanique de Dublin. 1er août 1865.
Dr STIRTON (James), à Glasgow. 6 février 1869.

Belgique.

MOREEN (Édouard), professeur de botanique à l'Université de Liège. 12 janvier 1859.

Brésil.

GLAZIOU, directeur du Jardin botanique de Rio-Janeiro. 4 mars 1868.

Italie.

NARDO (de), professeur à Venise. 6 février 1844.
TARGIONI-TOZETTI, professeur de botanique à Florence. 10 nov. 1846.

Portugal.

BARBOZA-DUBOCAGE, membre de l'Académie royale de Lisbonne. 12 mars 1862.
O CASTELLO DA PAÏVA, membre de l'Académie royale de Lisbonne. 4 décembre 1866.

Russie.

KUTORGA, professeur à Saint-Pétersbourg. 4 juin 1855

Suède et Norvège.

ARESCHOUG, professeur à l'Université d'Upsal. 11 janvier 1859.
LOVEN, membre de l'Académie de Stockholm. 8 février 1848.

Suisse.

FAVRE (Alph.), professeur de géologie à Genève. 2 décembre 1862.
PICTET (Franç. Jul.), professeur à l'Académie de Genève. 7 déc. 1841.

SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY

ANNÉE 1885

PREMIÈRE PARTIE

PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES

Séance du 16 janvier 1885.

Présidence de M. Gross.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Barthélemy, Bleicher, Blondlot, Chevalier, Fliche, Floquet, Friant, Gross, Haller, Hecht, Klobb, Kœhler, Le Monnier, Millot, Stoeber, Thouvenin, Wohlgemuth.

Rapports et élections. — M. Bleicher présente des rapports verbaux sur les candidatures de MM. Pérot, intendant militaire en retraite; Lecat, professeur au Lycée de Nancy, et Riston, licencié en droit.

M. Blondlot fait un rapport sur la candidature de M. Bertin. M. Arth sur celle de M. Guntz, chargé de cours à la Faculté des sciences, et M. Kœhler sur celle de M. Saint-Remy, préparateur suppléant à la même Faculté. Les conclusions favorables de ces rapports ayant été adoptées, MM. Pérot, Lecat, Riston, Bertin, Guntz et Saint-Remy sont élus membres titulaires de la Société des sciences.

Élections pour le renouvellement du bureau pour l'année 1885. — Élection d'un vice-président, d'un secrétaire général et d'un membre du conseil d'administration.

M. le Président fait observer qu'un secrétaire annuel venant d'être élu dans une des dernières séances, il n'y a pas lieu de procéder à cette élection.

M. Schlagdenhauffen est élu, à la majorité des votants, vice-président pour l'année 1885.

M. Hecht, secrétaire général, indéfiniment rééligible d'après les statuts, est réélu à la majorité des voix.

A la majorité des voix, M. Fliche est maintenu dans ses fonctions de membre du conseil d'administration.

A la fin de la séance, M. Friant, trésorier, rend compte de la situation financière de la Société. A l'unanimité, son rapport est approuvé.

COMMUNICATIONS.

I. Botanique. — M. Le Monnier présente à la Société un pied de *Primula prænitens*, Ther., à fleurs monstrueuses. Les calices et les corolles offrent la texture des feuilles ; les étamines, également colorées en vert, contiennent du pollen incomplètement formé. L'ovaire, plus long que de coutume, renferme un placenta dont le sommet porte un grand nombre de petites fleurs disposées en ombelle.

Ces déformations ont d'ailleurs été toutes signalées par M. T. Masters (*Vegetable Teratology*, p. 45, 133, etc.).

M. Fliche entretient la Société d'un *voyage botanique* qu'il a effectué au mois de mai 1884 *dans l'Italie centrale*. Grâce à l'obligeance de MM. Siemoni, inspecteur général des forêts, et Pirotta, professeur à la Faculté des sciences, directeur du Jardin botanique de Rome, il lui a été possible de se rendre compte de l'organisation de l'enseignement des établissements botaniques à Rome ; de faire aussi quelques herborisations intéressantes. On peut en exécuter dans l'intérieur même de la ville, où se trouvent des quartiers à peu près déserts, où les ruines surtout nourrissent une flore variée. M. Haro a déjà fait de cette dernière une étude importante dont les résultats sont consignés dans le Bulletin de la Société ; il n'y a pas à y revenir. A côté de cette végétation spéciale, il convient de citer celle des villas et de la promenade du Pincio. En partie spontanée, mais due aussi, et principalement en ce qui concerne les arbres, à des plantations, elle se fait remarquer par des associations d'espèces que nous ne rencontrons en France, ni dans le Nord ni dans le Midi. Celle, par exemple, de l'*Araucania brasiliensis* et du *Picea excelsa*, l'un et l'autre bien venants. Le mélange d'espèces des régions chaudes et de celles qui sont adaptées au climat de l'Europe centrale, se retrouve dans la plus grande partie de la flore spontanée des collines ou des montagnes, qu'on l'étudie à Orvieto ou dans les monts Albains. Les chênes à feuilles persistantes sont rares ; on rencontre dans les forêts des chênes à feuilles caduques, le frêne-orne et l'ostrya, si caractéristiques de la végétation forestière italienne ; le hêtre, rare d'ailleurs, descend à une altitude remarquablement basse pour la région, dans les monts Albains ; le châtaignier, évidemment introduit et substitué aux espèces primitives qui ont disparu devant les abus de jouissance, est aujourd'hui très commun. La Campagne romaine en grande partie couverte d'herbages, pâturés ou fauchés, présente une abondante population de graminées, parmi lesquelles certaines espèces

rappelant les céréales, l'*Avena barbata* et le *Triticum villosum*, par exemple, sont parfois assez abondantes pour donner l'illusion de la culture. Aux plantes de cette famille s'en trouvent mélangées beaucoup d'autres, parmi lesquelles des espèces habitant la côte et ne se retrouvant pas sur le continent en France, fait qu'on observe d'ailleurs dans toutes les régions botaniques des environs de Rome. Vers la mer, on trouve de fort beaux maquis, et la célèbre forêt de pins piniers de Castelfutano ; le caractère de la végétation est franchement méridional ; la *pineta*, par son massif forestier et les espèces arbustives ou herbacées qu'il surmonte, par son sol très meuble aussi, rappelle toutes les forêts semblables que l'auteur de la communication a eu occasion d'étudier en France et en Italie.

En terminant, M. Fliche expose avec quelques détails le résultat de ses observations sur la culture des Eucalyptus qu'il a pu étudier avec soin, surtout aux environs de l'abbaye de Saint-Paul-Trois-Fontaines, grâce aux religieux, propriétaires, qui ont facilité son travail et lui ont fourni de nombreux renseignements. Les espèces employées sont à peu près exclusivement, comme résultat pratique, les *E. globulus* et *résinifère*, celui-ci préféré aujourd'hui parce qu'il est plus résistant à la gelée. Arbres de croissance extraordinairement rapide, ils peuvent être précieux pour fournir du bois et assainir le pays, d'après ce qu'on a constaté dans la Campagne romaine, mais seulement lorsque le climat est suffisamment chaud et le sol de bonne qualité, ils peuvent être à leur place en Algérie, peut-être en Corse ; mais en France ils ne paraissent jamais devoir jouer un rôle de quelque importance autrement que comme arbres d'ornement dans quelques stations publiques de la région méditerranéenne.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 2 février 1885.

Présidence de M. SCHLAGDENHAUFFEN, vice-président.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Bertin, Bleicher, Blondlot, Dumont, Chevalier, Fliche, Friant, Guntz, Haller, Held, Kœhler, Laviéville, Lecat, Schlagdenhauffen, Saint-Remy, Thouvenin.

A propos du procès-verbal, M. Fliche fait remarquer que dans les Sociétés analogues à la Société des sciences, on se borne dans les comptes rendus à mentionner le rapport verbal fait sur une candidature, sans en donner le résumé. Il demande que la Société des sciences suive cet usage. Cette proposition mise aux voix est adoptée.

Il est décidé en outre que le procès-verbal de la séance précédente sera modifié dans ce sens.

Démission. — M. le Président communique une lettre de M. Lécuyer donnant sa démission de membre titulaire de la Société.

Présentations. — MM. Bleicher et Volmerange présentent M. Viller comme membre titulaire.

MM. Macé et Kœhler présentent au même titre M. Prenant.

COMMUNICATIONS.

Physique. — M. Blondlot communique à la Société le résultat des recherches qu'il a faites sur les propriétés électriques de l'eau à l'état liquide et à l'état solide.

M. Blondlot a observé *un dégagement d'électricité lors du frottement mutuel de la glace et de l'eau à l'état liquide.*

En faisant couler un filet d'eau à 0° sur un bloc de glace, on trouve que le potentiel est variable dans la nappe d'eau qui revêt la glace ; il augmente d'aval en amont. D'après la théorie de l'endosmose électrique et des courants de diaphragme établie par M. Quincke, il en résulte que l'eau s'électrise positivement par contact avec la glace. On a ainsi un exemple de deux corps chimiquement identiques et ne différant que par leur état physique, qui s'électrisent par leur contact mutuel.

M. P. Dumont fait remarquer que ce fait doit être rapproché de cet autre que deux morceaux de verre, l'un poli, l'autre dépoli, s'électrisent lorsqu'on les frotte l'un contre l'autre.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

Séance du 23 *février* 1885.

Présidence de M. Floquet.

Membres présents : MM. Barthélemy, Bertin, Bleicher, Chevalier, Dumont, Fliche, Floquet, Hecht, Jaquiné, Lecat, de Metz-Noblat, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Volmerange.

M. le Président donne lecture : 1° d'une lettre de M. Bertin, remerciant la Société, qui, dans une de ses dernières séances, l'a nommé membre titulaire ; 2° d'une circulaire de M. le ministre de l'instruction publique invitant les membres de la Société qui voudront prendre part au Congrès de la Sorbonne, à se faire inscrire avant le 8 mars prochain ; 3° d'une lettre du secrétaire de l'Académie de Stanislas qui informe la Société que cette Académie offre un prix de 500 fr. à décerner en 1886 au mémoire de chimie appliquée aux arts, à l'industrie ou à l'agriculture, qui lui paraîtra le plus recommandable.

Élection. — M. Volmerange fait un rapport verbal sur la candida-

ture de M. Viller, ingénieur en chef des ponts et chaussées en retraite, à Nancy, comme membre titulaire.

M. Viller est élu à l'unanimité membre titulaire de la Société.

COMMUNICATION.

Géologie. — M. Bleicher expose le résultat de ses recherches sur l'*âge de la grouine dans la vallée de la Meurthe.*

On connaît sous le nom local de *grouine* ou *groise* un dépôt d'éboulis de roches calcaires plus ou moins fragmentées et mêlées au sable et aux cailloux diluviens, qui forme des placages ou des remplissages de fissures à différente hauteur sur les collines qui bordent les vallées des rivières de la région jurassique lorraine.

L'âge de la grouine, d'après tous les géologues qui s'en sont occupés, est récent, mais il reste à relier cette formation aux alluvions quaternaires de différents âges et à rechercher sa signification au milieu des phénomènes qui ont signalé cette époque si tourmentée.

D'après M. Bleicher, il existe sur la colline de Malzéville à mi-côte, et jusque vers le sommet, de la grouine superposée au diluvium des plateaux à *Elephas antiquus,* remplissant les fissures, tandis que dans la grouinière exploitée en face de l'usine Xardel vers le fond de la vallée de la Meurthe, mais au-dessus de la dernière terrasse diluvienne, la grouine, très puissante en ce point, est surmontée du *diluvium rouge* sableux qui est le dernier terme de la série diluvienne. Cette grouine contient des coquilles terrestres déterminables, au nombre de quatre jusqu'ici, parmi lesquelles *Cyclostoma elegans.* En résumé, l'auteur de cette communication est d'avis qu'il y a des grouines de différents âges, mais que leur époque de formation la plus active correspond à la fin de la période glaciaire.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

Séance du 4 mars 1885.

Présidence de M. Floquet.

Membres présents : MM. Barthélemy, Bichat, Bleicher, Blondlot, Chevalier, Dumont, Fliche, Floquet, Friant, Guntz, Hasse, Hecht, Henry, Held, Herrgott père, Humbert, Klobb, Kœhler, Lecat, Le Monnier, Macé, Millot, Pérot, Saint-Remy, Schlagdenhauffen, Viller, Thouvenin.

Rapport et Élection. — M. Macé fait un rapport verbal sur la candidature de M. Prenant, aide d'histoire médicale à la Faculté de médecine, comme membre titulaire.

M. Prenant ayant réuni l'unanimité des suffrages, est déclaré membre titulaire de la Société.

COMMUNICATIONS.

I. **Mathématiques.** — M. Floquet dit quelques mots d'un travail de M. Charé, professeur en retraite, *sur les polygones réguliers*.

II. **Physique.** — M. Bichat expose le résultat de ses recherches sur la *cristallisation des paratartrates*.

Parmi les paratartrates des différentes bases, il n'y en a qu'un petit nombre qui, en cristallisant, se dédoublent pour donner des poids égaux de tartrates droits et de tartrates gauches. D'après M. Pasteur, ce dédoublement ne peut se faire que sous l'action de forces dissymétriques dues à la présence, lors de la cristallisation, de germes existant dans le liquide ou sur les parois des vases qui le contiennent. D'autre part, un savant italien, M. Scacchi, prétend expliquer le phénomène en se basant simplement sur la différence de solubilité entre les tartrates et les paratartrates correspondants. Des expériences nombreuses faites par M. Bichat montrent que la raison invoquée par M. Scacchi ne peut rendre compte des faits.

Dans des vases purgés des germes, une dissolution de paratartrate ne laisse déposer que des cristaux de paratartrate et jamais de tartrate droit ou gauche. On doit en conclure avec M. Pasteur que le dédoublement est bien dû à la présence de germes existant dans l'atmosphère en contact avec le liquide.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

Séance du 16 *mars* 1885.

Présidence de M. Floquet.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Chenu, Chevalier, Dumont, Fliche, Floquet, Gény, Hecht, Henry, Herrgott père, Humbert, Jaquiné, Koehler, Laviéville, Macé, de Metz-Noblat, Pérot, Saint-Remy, Schlagdenhauffen, Thouvenin; Viller, ingénieur; Viller, licencié en droit; Volmerange, Wohlgemuth.

Présentation. — MM. Hecht et Floquet présentent M. Calinon comme membre titulaire.

COMMUNICATIONS.

Physique. — 1° M. Dumont décrit et présente à la Société des types des différents *obturateurs instantanés* employés en photographie; il expose les critiques adressées à chacun d'eux et indique un certain nombre d'améliorations à y apporter. Il met sous les yeux des membres présents, une collection de vues d'objets en mouvement obtenues à l'aide de ces différents obturateurs avec des temps de pose variant de $^1/_{10}$ à $^1/_{100}$ de seconde.

M. Dumont décrit ensuite un nouveau *photomètre photographique* qu'il croit destiné à rendre de grands services aux praticiens. C'est une communication de M. Olivier, présentée dans le courant de janvier à l'Académie des sciences qui lui en a suggéré l'idée théorique. M. Olivier affirme que le radiomètre, si l'on prend soin de l'entourer d'écrans monochromiques formés de cuves renfermant une solution de sulfate de cuivre ammoniacal, tourne avec une vitesse qu'on peut dans la pratique considérer comme proportionnelle à l'action chimique, c'est-à-dire photographique, des rayons lumineux auxquels il est exposé. M. Dumont, pour rendre l'instrument pratique, fait souffler autour de la sphère du radiomètre une sphère concentrique de verre qui servira de récipient à la solution de sulfate de cuivre ou à tout autre liquide, l'appareil dont les tours se compteront facilement à l'aide d'un signe distinctif marqué sur une des palettes mobiles (dispositif indiqué par M. Olivier), sera placé au fond d'un tronc de cône formé d'étoffe légère et opaque, de façon à ne recevoir par le grand diamètre resté ouvert, qu'une quantité de lumière proportionnelle à celle émise par l'objet à photographier. L'intensité lumineuse variant, toutes autres choses égales d'ailleurs, on obtiendra un bon cliché si l'exposition a duré pendant un nombre de révolutions du radiomètre égal à celui qu'une expérience préliminaire aura une fois pour toutes indiqué. M. Dumont tiendra la Société au courant des expériences qu'il se propose de faire avec cet instrument.

Discussion. — M. Blondlot ne pense pas que le nombre de tours faits en un temps donné par le tourniquet du radiomètre puisse indiquer exactement l'intensité de la lumière; car il est démontré que c'est sous l'influence des rayons calorifiques que le radiomètre tourne. — Aussi ne croit-il pas que cet appareil puisse servir à indiquer la durée du temps de pose.

M. Dumont répond qu'une indication absolument précise de l'intensité de la lumière n'étant pas absolument nécessaire, les renseignements donnés par le radiomètre, modifié comme il l'a dit, sont suffisants pour la pratique d'après les expériences de M. Olivier.

2° M. Blondlot fait part à la Société des recherches entreprises par M. Bichat et lui sur les *différences électriques entre les liquides.*

3° M. Blondlot expose comment il est parvenu à démontrer que *l'air échauffé à la température du rouge obéit à la loi des tensions de Volta et fait partie de la série des tensions formée par les métaux.*

Voici l'expérience qui le prouve. Une cloche de porcelaine vernissée, fixée de manière que l'ouverture soit en bas, est chauffée par l'extérieur de manière à porter l'atmosphère qu'elle contient à la température du rouge. Dans cette cloche sont disposées, en regard l'une de l'autre, deux plaques, l'une de cuivre (ou de fer) et l'autre de platine, supportées par des colonnes de platine reliées aux pôles d'un

électromètre capillaire. L'expérience montre que l'électromètre reste au zéro et que même, s'il a été préalablement dévié à dessein, il y est ramené par le circuit comprenant l'air chaud. Il faut en conclure que cet air obéit à la loi des tensions.

On peut en déduire comme corollaire qu'il est extrêmement probable que l'air ne joue aucun rôle dans les mesures de la différence électrique de deux métaux exécutées par la méthode de Volta ou les méthodes analogues.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 16 avril 1885.

Présidence de M. FLOQUET.

Membres présents : MM. Bagnéris, Barthélemy, Beaunis, Bertin, Bleicher, Bichat, Chevalier, Fliche, Floquet, Herrgott père, Humbert, Lecat, Le Monnier, Millot, de Metz-Noblat, Pérot, Saint-Remy, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller, Volmerange.

Rapport et Élection. — M. Floquet fait un rapport verbal sur la candidature de M. Calinon, présentée dans la dernière séance.

A l'unanimité, M. Calinon, chef de la comptabilité des usines et forges de Pompey, est élu membre titulaire de la Société.

COMMUNICATIONS.

I. **Botanique.** — M. FLICHE communique à la Société le résultat de ses recherches sur les *substitutions anciennes d'essences forestières aux environs de Nancy.*

II. **Météorologie.** — M. MILLOT expose la *classification des nuages de Poëy* et fait ressortir les avantages qu'elle présente sur la nomenclature d'Howard employée jusqu'ici. Il signale quelques lacunes et indique quelques modifications qu'il serait nécessaire d'y apporter. (Ces deux communications seront insérées *in extenso* dans les Mémoires de la Société.)

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 1er mai 1885.

Présidence de M. SCHLAGDENHAUFFEN, vice-président.

Membres présents : MM. Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Charpentier, Chenu, Chevalier, Dumont, Guntz, Koehler, Le Monnier, Millot, Pérot, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller, Volmerange, Wohlgemuth.

Présentation. — MM. Bleicher et Barthélemy présentent M. Maurice des Robert comme membre associé de la Société.

COMMUNICATION.

Optique. — M. A. CHARPENTIER fait une communication sur *l'influence de l'obscurité sur les fonctions visuelles.*

On sait qu'en passant d'un lieu éclairé dans un lieu sombre, on commence par être comme aveuglé, on ne distingue aucun détail de l'espace environnant; ce n'est que peu à peu qu'une sorte d'adaptation se produit entre le fonctionnement de l'œil et l'éclairage ambiant, de manière à permettre, au bout d'un temps plus ou moins long, un certain degré de vision. Cette vision est assez imparfaite, mais il n'en est pas moins vrai que la délicatesse des perceptions visuelles hausse et baisse en même temps que l'éclairage.

Sur quelle fonction porte cette adaptation? M. Charpentier a prouvé par des travaux antérieurs que, dans la perception d'un objet coloré comprenant des détails multiples, on peut distinguer trois processus différents : perception lumineuse simple, perception de couleur, perception de forme. Chacune de ces trois perceptions exige, pour se produire, des quantités de lumière différentes; ces quantités de lumière peuvent servir à mesurer la délicatesse de chaque perception spéciale. Or, l'adaptation à l'éclairage ambiant ne porte pas sur la perception de couleur ni sur la perception de forme; seule la perception lumineuse varie en même temps que cet éclairage, et on pourrait assez facilement mesurer l'un par l'autre.

La perception lumineuse peut donc varier dans des proportions considérables, de 1 à 500 et même davantage.

Combien de temps exige pour se produire cette adaptation de la perception lumineuse à un nouvel éclairage? Cela dépend de la différence qui existe entre ce dernier et l'éclairage primitif. Il faut environ 20 ou 25 minutes à un œil habitué à l'éclairage d'un jour moyen pour être adapté définitivement à l'obscurité complète, c'est-à-dire que ce n'est qu'après 25 minutes environ que la perception lumineuse ne varie plus. Il faut évidemment d'autant moins de temps qu'il y a moins de différence entre l'éclairage primitif et le nouveau.

M. Charpentier a étudié la marche de l'augmentation de la perception lumineuse d'un œil transporté du grand jour dans l'obscurité. Aubert (de Rostock) avait déjà étudié la question en recouvrant l'œil, à des intervalles de temps plus ou moins rapprochés, avec des verres noirs en nombre suffisant pour éteindre la perception d'un fil de platine rendu lumineux par un courant constant.

M. Charpentier détermine simplement de minute en minute, avec son photoptomètre, le minimum de lumière perceptible. L'auteur s'est assuré préalablement que cette détermination ne trouble pas la marche de l'adaptation lumineuse. La valeur du minimum perceptible diminue

d'abord très vite, puis de plus en plus lentement; la courbe de cette diminution ressemble assez à celle du refroidissement des corps chauds. Le minimum perceptible diminue d'autant plus vite que sa valeur à un moment donné diffère davantage de la valeur définitive qu'il acquiert par une adaptation complète à l'obscurité.

C'est cette valeur définitive qui doit servir de terme de comparaison, dans la mesure photométrique des intensités lumineuses d'après la méthode de l'auteur.

Cet accroissement de la perception lumineuse dans l'obscurité paraît en rapport avec la régénération du rouge visuel de Boll et de Kühne.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 15 *mai* 1885.

Présidence de M. SCHLAGDENHAUFFEN, vice-président.

Membres présents : MM. Bertin, Bleicher, Charpentier, Hecht, Held, Humbert, Millot, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller, Volmerange.

Élection. — La Société procède au vote pour l'admission de M. Maurice des Roberts comme membre associé. M. des Roberts est élu à l'unanimité.

La Société décide qu'il sera nommé, dans la prochaine séance, une commission chargée de préparer le programme des questions à proposer pour être discutées au Congrès des Sociétés savantes à Paris en 1886.

COMMUNICATION.

Optique. — M. CHARPENTIER fait une communication sur l'*influence des perceptions d'un œil sur celles de l'autre.*

Les deux yeux sont reliés l'un à l'autre par des connexions nerveuses encore mal connues, mais dont l'existence est indubitable. La preuve la plus nette est qu'ils fonctionnent simultanément, et que les impressions doubles qu'ils reçoivent se fusionnent en une perception unique; il y a donc au moins un centre nerveux commun aux deux yeux.

On peut dès lors se demander si, par la voie de ce centre commun, une impression affectant un seul œil se communique à l'autre en partie, ou, d'une façon générale, si les perceptions d'un œil influent sur celles de l'autre.

Certains auteurs ont prétendu qu'une image développée dans un œil était perçue en même temps par l'autre œil non excité. M. Charpentier n'a pas pu retrouver ces images induites, mais il a cherché à résoudre la question par une autre voie, en déterminant l'état de la sensibilité de l'un des yeux, d'une part, quand l'autre œil ne reçoit aucune lumière, d'autre part, ce second œil étant excité par une source lumineuse assez

intense. L'œil gauche, par exemple, étant appliqué à l'oculaire du photomètre de l'auteur, on détermine comparativement le minimum perceptible pendant que l'œil droit est maintenu dans l'obscurité ou exposé au grand jour. Jamais, dans ces conditions, l'on n'a pu observer de différence dans la sensibilité du premier œil.

On peut se placer dans des conditions encore plus favorables pour cette recherche, en faisant varier dans des proportions énormes l'excitabilité de l'œil influençant. On sait combien cette excitabilité s'accroît quand l'œil est maintenu pendant un certain temps dans l'obscurité, et combien ensuite elle diminue rapidement par l'exposition du même œil à la lumière.

Or j'ai, dans plusieurs expériences, maintenu les deux yeux dans l'obscurité pendant au moins 20 minutes, et même une fois pendant une heure. Puis le minimum perceptible était déterminé pour l'œil gauche, par exemple, l'autre œil restant fermé; on ouvrait alors l'œil droit largement en face du ciel, qu'on regardait pendant plusieurs minutes. Le minimum perceptible, déterminé ensuite, était resté le même.

Seulement, sous l'influence de cette illumination de l'œil droit, un phénomène très curieux se manifestait de l'autre côté. Dans l'obscurité, le champ visuel était devenu complètement obscur; dès que l'œil droit était exposé à la lumière, l'œil gauche paraissait lui-même éclairé à un degré moindre, avec une apparence de fourmillement lumineux tout à fait remarquable : on eût dit une circulation intense et continuelle de points éclairés; puis, fermait-on l'œil droit, des figures sombres et étoilées couvraient d'une trame assez lâche le champ visuel, enfin la trame se resserrait et l'obscurité envahissait le champ tout entier.

Cette suite de perceptions lumineuses est évidemment un phénomène subjectif, purement cérébral, car si l'impression développée avait pour siège l'appareil visuel gauche dans toute son étendue, le minimum perceptible serait nécessairement augmenté (d'après mes expériences antérieures). Or, ce minimum conserve la même valeur; seulement il paraît plus blanc qu'avant l'exposition de l'œil droit à la lumière.

En résumé, l'excitation reçue par un œil peut se répercuter, non sur l'autre œil, mais sur l'appareil percepteur commun.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 2 juin 1885.

Présidence de M. FLOQUET.

La séance a lieu à l'amphithéâtre de physique de la Faculté des sciences et se termine par une visite à l'observatoire météorologique de Nancy.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Beaunis, Bertin, Bleicher, Blondlot, Charpentier, Chenu, Chevalier, Dumont, Floquet, Godfrin, Guntz, Hecht, Held, Herrgott père, Humbert, Lallement, Lecat, de Metz-Noblat, Millot, Pérot, Prenant, Saint-Remy, des Robert, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller, ingénieur des ponts et chaussées en retraite, Viller, licencié en droit, Wohlgemuth.

COMMUNICATIONS.

I. Physiologie. — M. Beaunis fait une communication sur la *contraction simultanée des muscles antagonistes.*

Quand on relie les tendons de deux muscles antagonistes, le gastrocnémien, par exemple, et le tibial antérieur (fléchisseur du tarse) à deux tambours myographiques à transmission, et qu'on détermine par des excitations variées, des contractions réflexes, on voit, en général, les deux muscles antagonistes se contracter simultanément.

Cependant le phénomène n'est pas constant. En effet, dans les conditions expérimentales indiquées ci-dessus, les trois cas suivants peuvent se présenter :

1° *Les deux muscles antagonistes se contractent simultanément.* Dans quelques cas, les deux contractions sont calquées l'une sur l'autre ; elles débutent et finissent ensemble et la contraction d'un muscle est la reproduction fidèle de la contraction de l'autre, sauf généralement en un point, la hauteur de la contraction.

Mais souvent il n'en est pas ainsi et les deux contractions diffèrent de caractère. Ces différences peuvent porter sur le début, la terminaison, la durée, la hauteur et la forme de la contraction, et l'on peut, dans ces conditions, rencontrer toutes les variétés imaginables.

2° *Un des muscles se contracte ; le muscle antagoniste se relâche et s'allonge.* Ce relâchement du muscle se traduit sur le tracé par un abaissement de la courbe au-dessous de la ligne de début et indique un allongement du muscle. Cet allongement réflexe, que je crois avoir été le premier à signaler, rentre évidemment dans ces phénomènes d'arrêt que j'ai étudiés antérieurement.

3° Un seul des deux muscles se contracte, l'autre reste immobile.

Ces faits ont été observés sur la grenouille, le chien, le cobaye, le lapin.

Quand, au lieu de déterminer des contractions réflexes par des excitations, on laisse l'animal à lui-même, il se produit de temps en temps des contractions qu'on peut appeler spontanées ; dans ces conditions, les mêmes phénomènes peuvent se produire, contractions simultanées des antagonistes, relâchements musculaires, absolument comme dans les cas précédents. Il est bien évident que le terme *spontané* veut simplement dire « absence d'une excitation déterminée et intentionnelle »,

car l'animal est attaché sur la planchette du myographe et soumis par conséquent à des influences expérimentales qui peuvent agir comme excitantes.

En est-il de même aussi dans les contractions dites volontaires? Il est permis, je crois, de l'admettre, quoique la démonstration expérimentale en soit à peu près impossible chez les animaux.

Les faits que je viens d'exposer confirment expérimentalement les vues anciennes de Winslow, reprises et développées par Duchenne de Boulogne, sur le rôle des muscles antagonistes. Ces muscles ne sont donc pas, comme on l'admet généralement, uniquement passifs dans un mouvement donné. Ils interviennent, au contraire, d'une façon directe dans les mouvements, et le mouvement total n'est que la résultante des actions qui se passent dans les muscles antagonistes.

II. **Météorologie.** — M. Millot présente les instruments de l'observatoire météorologique de Nancy.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

Séance du 16 juin 1885.

Présidence de M. Floquet.

Membres présents : MM. Arth, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Chevalier, Floquet, Guntz, Gross, Hecht, Humbert, Jaquiné, Lecat, Le Monnier, Millot, Riston, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller.

M. le Président exprime les douloureux regrets que fait éprouver à la Société la perte d'un de ses membres correspondants, M. Olry, instituteur communal à Allain (Meurthe-et-Moselle).

M. le Président donne lecture des questions choisies, par la commission nommée à cet effet, pour être proposées au Congrès des Sociétés savantes en 1886.

COMMUNICATIONS.

I. **Mathématiques.** — M. Floquet rend compte d'un mémoire de M. Calinon, intitulé : *Étude critique sur la mécanique.* Ce travail sera publié *in extenso* dans le Bulletin de la Société.

II. **Géologie.** — M. Bleicher fait à la Société une communication sur la découverte qu'il vient de faire de *corps organisés attribuables à des diatomées,* dans une *plaque mince du silex hornstein* du terrain tertiaire d'eau douce de Riedisheim (Haute-Alsace).

Il rappelle en peu de mots la constitution du terrain tertiaire d'Alsace, qui a fait l'objet d'un de ses travaux les plus récents en collaboration avec M. le professeur Fliche, et décrit le gisement de ces silex, en insistant sur ce fait intéressant qu'on y constate l'apparition subite

de plantes évidemment oligocènes, immédiatement au-dessus de couches dont la faune paraît appartenir à l'éocène supérieur et a été considérée comme telle jusqu'ici.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 1er juillet 1885.

Présidence de M. SCHLAGDENHAUFFEN, vice-président.

Membres présents : MM. Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Godfrin, Kœhler, Klobb, Lecat, Macé, de Metz-Noblat, Millot, Le Monnier, Pérot, Prenant, Saint-Remy, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller, licencié en droit.

Présentation. — MM. Bleicher et Thouvenin présentent comme membre associé M. Thomas, vétérinaire en 1er au 10e régiment de hussards.

COMMUNICATION.

Zoologie. — M. PRENANT communique à la Société les résultats de ses recherches sur les *vers parasites des poissons.*

Les vers parasites des poissons de mer et d'eau douce qui ont été surtout examinés sont des vers plats. Le grand groupe des Nématodes a été en général laissé de côté.

121 poissons ont été examinés ; ils sont répartis entre 15 espèces.

Les recherches « sur les vers parasites des poissons » comprennent :

1° La distribution des parasites dans les divers poissons et la nomenclature des espèces rencontrées ;

2° La description de quelques parasites peu étudiés ou même nouveaux, et l'exposition de quelques faits anatomiques.

I.

Les faits statistiques principaux sont : la présence d'Anthocéphales libres chez la raie, alors qu'ils n'ont été décrits qu'enkystés ; — l'absence constatée sur 51 brochets d'Échinorhynques vivants, toutes les fois que des *Triænophorus* occupaient l'intestin du poisson ; d'où l'antagonisme, de cause purement mécanique, qui existe entre ces deux sortes de parasites ; — l'absence de certains parasites chez des poissons où ils passent pour être constants et dont ils sont réputés caractéristiques. — Certains faits, tels que celui du *Distomum tereticolle* que le brochet héberge, tendant à montrer que ce parasite ne se rencontre pas ailleurs que chez les brochets des lacs de la Suisse, où il devient constant et qu'il peut caractériser ; d'où l'intérêt qui s'attache, au point de vue de la géographie zoologique, à l'étude des parasites d'un poisson dans plusieurs régions. — Une nouvelle espèce de filaire vivant dans les artères branchiales du brochet.

II.

La partie anatomique contient surtout : quelques rectifications anatomiques au sujet des caractères de *Acanthobothrium Dujardinii*, et du diagnostic de cette espèce d'avec *Acanthobothrium coronatum* ; — la description incomplète de l'appareil excréteur de *Distomum tereticolle* ; — la description de la filaire nouvelle ; — quelques considérations au sujet de l'ampoule excrétrice protractile du *Distomum rufoviride*, et particulièrement de la musculature de cette ampoule comparée à celle des téguments et de quelques organes. Dans toutes ces parties, la couche musculaire se constitue : 1° d'une matrice musculogène ; 2° d'une couche de fibres contractiles. Celle-ci est simple ou double ; dans ce dernier cas, les deux assises sont assez différentes l'une de l'autre ; une ne présente rien de remarquable ; l'autre, formée d'un réseau à mailles souvent régulièrement quadrangulaires de fibres cylindroïdes, est assez bien caractérisée.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 15 juillet 1885.

Présidence de M. FLOQUET.

Membres présents : MM. Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Charpentier, abbé Chevalier, Dumont, Floquet, Guntz, Hecht, Herrgott père, Humbert, Millot, Le Monnier, Thouvenin, Viller, Volmerange.

Élection. — La Société procède au vote pour l'admission de M. Thomas, médecin-vétérinaire en premier au 10e régiment de hussards à Nancy, comme membre associé. M. Thomas est élu à l'unanimité.

COMMUNICATIONS.

1. **Météorologie.** — M. MILLOT expose les données sur lesquelles repose la *construction de la carte météorologique quotidienne de l'observatoire* ; il indique la clef nécessaire pour son interprétation.

La prévision du temps, telle qu'on la pratique aujourd'hui dans les observatoires des capitales de l'Europe, ainsi qu'aux États-Unis, est une prévision à courte échéance, c'est-à-dire pour 24 heures environ. C'est la seule que l'on puisse aborder dans l'état actuel de la science. Elle est basée sur la connaissance de la *situation relative* des aires de hautes pressions et des aires de basses pressions, sur la connaissance des phénomènes qui accompagnent ces deux façons d'être de l'atmosphère et sur celle de la *marche future* probable des aires de basses pressions.

On y arrive en centralisant, au moyen du télégraphe, les observations du baromètre et des autres instruments météorologiques faites au même moment dans un grand nombre de stations.

Si on porte sur une carte les diverses hauteurs simultanées du baromètre (ramenées au niveau de la mer), et si on joint par un trait continu les localités où la pression est la même, les lignes ainsi tracées portent le nom d'*isobares* ou lignes d'égale pression. On remarque que la pression barométrique est ordinairement distribuée de telle sorte qu'elle présente, en certains lieux, des minima autour desquels la pression va en augmentant dans toutes les directions, et, en d'autres points, des maxima autour desquels la pression va en diminuant d'une façon plus ou moins régulière. Ces aires de hautes et de basses pressions sont limitées par la courbe de pression moyenne, ou de 760 millimètres, que l'on marque d'un trait plus épais. Les premières s'appellent indifféremment *dépressions, tempêtes, tourbillons, cyclones, bourrasques,* etc. ; les secondes ont reçu, par antithèse, le nom *d'anticyclones.*

Les dépressions barométriques ont des dimensions considérables et excessivement variées, leur diamètre peut n'être que d'une centaine de lieues ; quelquefois une seule dépression couvre toute la surface de l'Europe. Dans les dépressions, les isobares affectent la forme de courbes fermées à peu près circulaires et concentriques et le minimum de pression peut atteindre 720 millimètres dans nos contrées.

La masse d'air qui en fait partie est toujours animée d'un mouvement de rotation, tantôt lent, tantôt rapide, autour d'un axe vertical passant par le lieu du minimum barométrique. Dans notre hémisphère, ce mouvement de rotation, s'effectue de droite à gauche, c'est-à-dire de l'est vers le nord, puis vers l'ouest et le sud et ainsi de suite. Dans son mouvement de rotation, le vent n'est pas parallèle aux isobares, mais incliné sur elles et vers le centre de la dépression, de telle sorte que c'est en décrivant des spirales que les masses d'air affluent vers le minimum barométrique pour rétablir l'équilibre. Dans l'hémisphère sud, le sens de la rotation est inverse, c'est-à-dire de gauche à droite. De là cette règle générale : tournez le dos au vent et la pression sera plus faible à votre gauche qu'à votre droite ; le centre de la dépression sera à peu près dans la direction de votre bras gauche étendu latéralement.

La force du vent est variable dans les différents points d'une dépression : elle est plus grande dans ceux où la vitesse de rotation et celle de translation s'ajoutent comme étant de même sens. Dans nos contrées, où les dépressions marchent le plus fréquemment de l'ouest vers l'est, c'est dans la moitié méridionale du tourbillon, à droite, par conséquent, de la trajectoire du centre, que le vent est habituellement le plus fort. En effet, indépendamment de son mouvement tourbillon-

naire, la dépression tout entière se déplace avec une vitesse des plus variables.

On appelle *dépressions secondaires* ou *satellites*, des dépressions à surface restreinte qui prennent naissance à l'intérieur d'une vaste dépression, le plus souvent dans le demi-cercle méridional de celle-ci, qui prend alors le nom de *dépression principale*. Ce sont les dépressions secondaires qui occasionnent les plus violentes tempêtes et les plus fortes averses, parce que, dans leur secteur sud, les vitesses de rotation et de translation de la dépression principale s'ajoutent à la vitesse de rotation qui leur est propre.

Voici le temps qu'il fait d'habitude dans les différentes régions soumises à l'influence d'une dépression. En supposant la zone circulaire d'un tourbillon divisée en huit secteurs, nord, nord-ouest, ouest, sud-ouest, etc., on aura :

Dans le secteur est, des vents de sud avec ciel couvert;

Dans le secteur sud-est, des vents de sud-ouest avec de la pluie ;

Dans le secteur sud, des vents d'ouest avec de la pluie ;

Dans le secteur sud-ouest, des vents de nord-ouest et des ondées alternant avec des éclaircies ;

Dans le secteur ouest, des vents de nord avec des éclaircies plus fréquentes.

Le ciel sera le plus souvent nuageux ou pur dans les trois secteurs nord, avec des vents de nord-est dans le secteur nord-ouest, des vents d'est dans le secteur nord et des vents de sud-est dans le secteur nord-est.

Le vent sera relativement faible dans les trois secteurs nord, relativement modéré dans les secteurs est et ouest, très inégal dans le secteur sud-ouest où le temps est à grains; il aura sa plus grande force dans les deux secteurs sud-est et sud, surtout dans la portion de ces secteurs située vers le tiers du rayon à partir du centre. Il en sera de même de la nébulosité et de la quantité de pluie. Quant à l'intensité absolue du vent, toujours moins grande en été qu'en hiver (sauf dans quelques cas particuliers), elle sera proportionnelle au rapprochement des isobares ou à la *pente barométrique*.

Lorsqu'une dépression a une surface restreinte, les mauvais temps tendent à sévir, *en hiver*, aussi bien dans le demi-cercle méridional que dans l'hémicycle nord.

Si la dépression est légère, les vents resteront faibles ou modérés ; et *pendant l'été*, des *orages* éclateront dans le demi-cercle sud-est, c'est-à-dire en France quand le centre de la dépression sera au large de nos côtes de l'Océan.

En hiver, les dépressions seront plus accentuées, les vents plus forts, et la *neige* tombera dans les secteurs nord-ouest, ouest, sud-ouest et sud.

Au printemps, les grains des secteurs sud-ouest et ouest seront remplacés par des *giboulées* de neige et de grésil.

En été, la chaleur sera tempérée dans tous les secteurs du demi-cercle occidental d'une dépression, à cause des vents de nord; elle sera orageuse et accablante dans les secteurs du demi-cercle oriental à cause des vents de sud.

En hiver, pour la même raison, il fera doux en avant du centre de la dépression et le froid sévira après le passage du centre.

Les *gelées printanières* se manifestent toujours dans le demi-cercle occidental d'une dépression dont le centre s'éloigne après avoir passé sur l'Angleterre, ou bien dans le demi-cercle septentrional d'une dépression dont le centre est sur la Méditerranée.

Les *pluies générales et de longue durée* se produisent surtout quand une dépression légère stationne sur la France, ou quand une série de petites dépressions s'y succèdent rapidement.

Les *brouillards,* en hiver, sont amenés chez nous par les dépressions méditerranéennes.

La plupart des dépressions observées en Europe nous arrivent toutes formées de l'Océan Atlantique. Elles abordent généralement notre continent de façon que leur centre passe sur les îles Britanniques suivant une trajectoire dirigée de l'ouest-sud-ouest à l'est-nord-est, ou du sud-ouest au nord-est. Quelques-unes, venant du nord-ouest, traversent l'Angleterre et l'Europe centrale pour aller s'évanouir sur la Méditerranée. D'autres, marchant droit à l'est, se présentent vers nos côtes de l'Océan et traversent l'Europe dans toute sa largeur; d'autres enfin, venues des Açores parcourent les rivages méditerranéens ou, plus rarement, remontent droit au nord en passant au large de nos côtes.

Quant aux tourbillons qui prennent naissance en Europe, ceux qui nous intéressent le plus sont ceux qui se forment sur le golfe de Gênes et sur le golfe de Gascogne. Les premiers restent généralement un ou deux jours stationnaires en augmentant d'énergie, avant de prendre leur chemin vers l'est. Ce sont eux qui font souffler le mistral dans la vallée du Rhône et occasionnent des brouillards ou des gelées chez nous.

Les tourbillons du golfe de Gascogne restent également un ou deux jours stationnaires comme s'ils hésitaient sur la route à suivre. Ce sont eux qui, en été, occasionnent des orages en France. Tantôt ils traversent la France du sud-ouest au nord-est, tantôt ils se rendent dans la Méditerranée en franchissant l'isthme pyrénéen.

Jamais une dépression n'a traversé la France venant d'une direction orientale.

Les dépressions se succèdent généralement à la file, en augmentant d'importance jusqu'à celle du milieu, pour aller ensuite en diminuant. Une pluie continue n'est donc pas une précipitation unique, mais la

répétition fréquente du même phénomène, que la girouette indique en revenant chaque fois au sud-ouest, quand le vent a tourné à l'ouest et au nord-ouest, et le baromètre en oscillant sans cesse. Quand donc on verra, après une première dépression, le vent reculer au sud-ouest, au lieu de continuer sa rotation vers le nord, c'est qu'une seconde dépression arrive, suivant de près la première.

Les caractères essentiels des *anticyclones* sont, outre la pression élevée, l'écartement des isobares, par conséquent le calme de l'air, la sécheresse et le beau temps fixe, avec chaleurs ou froids excessifs suivant la saison, conséquence de la grande pureté de l'air. En hiver, les anticyclones amènent les froids intenses ainsi qu'on l'a vu en 1879-1880. En été, ils amènent les sécheresses.

La fréquence des dépressions sur nos contrées fait que les anticyclones ne s'y établissent que d'une façon accidentelle. Ils sont plus fréquents et plus durables au centre des vastes continents : en Europe, c'est en Russie qu'ils règnent le plus habituellement et parfois l'anticyclone de Russie se prolonge à travers le continent jusque sur la France, sous la forme d'une bande allongée comprise entre deux zones de basses pressions.

A cause de la densité de l'air dans les anticyclones et de l'inertie de sa masse, ceux-ci sont assez stables, difficiles à entamer, ils ne se déplacent qu'avec lenteur et n'ont pas de mouvement qui leur soit propre. Tantôt ils s'évanouissent sur place, détruits à la longue par les appels d'air des dépressions qui se succèdent ou séjournent dans leur voisinage ; tantôt ils sont entraînés lentement dans un mouvement plus général de l'atmosphère. Ils opposent donc souvent une barrière infranchissable aux tourbillons qui les abordent ; ils modifient la marche des dépressions en forçant celles-ci à les contourner et à circuler dans les intervalles qu'ils laissent entre eux. Aussi pour indiquer la marche future probable d'une dépression, doit-on tenir grand compte d'un anticyclone qui se trouverait sur la route habituelle de la dépression.

Une remarque importante, c'est que, pour qu'il y ait tourbillon, il n'est pas nécessaire que le minimum barométrique central soit inférieur à la pression moyenne, il suffit qu'il soit inférieur à la pression exercée sur les contrées environnantes. Pour une raison analogue, les anticyclones peuvent aussi n'être que relatifs.

Actuellement 125 stations, dont 42 en France, envoient leurs observations à Paris et les pronostics formulés dans la dépêche quotidienne envoyée dans toute la France, se vérifient en moyenne 80 à 82 fois pour 100 pour les avertissements maritimes affichés dans les ports et 73 à 75 fois pour 100 pour les avertissements agricoles, car les influences locales ont ici plus d'importance. Les chances d'erreur diminuent à mesure que le réseau d'observations se complète et que le personnel devient plus exercé.

II. **Chimie.** — M. Guntz donne le résultat de ses recherches sur la *chaleur de formation de quelques composés de l'antimoine.*

L'iode et le brome se combinent à l'antimoine avec un dégagement de chaleur assez considérable. L'on a, en effet, à la température de 16°:

$$Sb \text{ solide} + 3\,Br \text{ gaz} = SbBr^3 \text{ solide} + 76^{cal},9$$
$$Sb \text{ solide} + 3\,Io \text{ gaz} = SbIo^3 \text{ solide} + 45^{cal},4$$

Ces nombres, comparés à ceux obtenus pour l'arsenic, montrent que les affinités chimiques de l'antimoine sont semblables à celles de l'arsenic, tout en étant plus énergiques.

L'oxyde d'antimoine, en se combinant avec le bitartrate de potasse pour former l'émétique, absorbe de la chaleur. De plus, les solutions d'émétique traitées par des équivalents successifs de base ou d'acide dégagent des quantités de chaleur décroissantes.

Ces deux séries de phénomènes montrent que, dans l'émétique, l'oxyde d'antimoine ne joue pas le même rôle que la potasse, et qu'il doit saturer une des fonctions alcooliques de l'acide tartrique.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

Séance du 1er août 1885.

Présidence de M. Schlagdenhauffen, vice-président.

Cette séance a lieu dans l'amphithéâtre de physique de la Faculté des sciences.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bichat, Bleicher, Chevalier, Fliche, Guntz, Herrgott père, Lavreville, Lecat, Millot, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Viller.

COMMUNICATION.

Physique. — M. Bichat présente un *nouveau modèle de tourniquet électrique* permettant d'étudier cet instrument dans des conditions parfaitement déterminées et comparables.

Le tourniquet à pointes employé jusqu'à présent ne remplit nullement ces conditions : il est impossible en effet de faire deux pointes identiques, et, d'autre part, par suite du fonctionnement du tourniquet, les pointes s'altèrent d'une manière absolument arbitraire.

Dans le nouvel instrument, les pointes sont remplacées par des fils métalliques de très petit diamètre que l'on peut toujours remplacer par des fils identiques ou par d'autres fils de diamètre et de nature différents, ce qui permet d'étudier les diverses circonstances qui peuvent influer sur la marche de cet appareil.

M. Bichat fait fonctionner le nouveau tourniquet devant la Société,

et il indique quelques-uns des résultats que son étude lui a déjà permis d'obtenir.

M. Bichat présente, en son nom et au nom de M. Blondlot, un *nouvel électromètre* destiné à la mesure des hauts potentiels. Cet instrument, d'une construction simple, fonctionne avec la plus grande régularité ; il permet d'évaluer les potentiels en valeur absolue.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance du 16 novembre 1885.

Présidence de M. FLOQUET.

Membres présents : MM. Arth, Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Brunotte, Chevalier, Fliche, Floquet, Guntz, Held, Herrgott père, Hecht, Humbert, Henri, Jaquiné, Klobb, Le Monnier, de Metz-Noblat, Pérot, Riston, Schlagdenhauffen, Thouvenin, Vuillemin.

M. le Président donne lecture d'une lettre de M. Thomas, remerciant la Société de l'avoir nommé membre associé.

M. le Président exprime les regrets que fait éprouver à la Société des sciences la perte d'un de ses membres titulaires les plus distingués, M. Bach, doyen honoraire de la Faculté des sciences.

MESSIEURS,

Pendant ces vacances, la Société des sciences de Nancy a fait une perte douloureuse dans la personne d'un de ses membres les plus éminents. M. Bach, doyen honoraire des Facultés des sciences de Strasbourg et de Nancy, est décédé à Marlenheim, le 9 octobre dernier, à l'âge de 72 ans.

S'il ne nous a pas été donné d'adresser à notre cher confrère le suprême adieu, nous avons du moins la satisfaction de savoir que l'un de nos membres correspondants, M. le professeur Hugueny, a su le faire en termes émus et bien dignes d'une vieille amitié. Qu'il reçoive ici l'expression de notre reconnaissance.

C'est le 9 janvier 1861 que M. Bach fut admis à la Société des sciences naturelles de Strasbourg. Vous savez, Messieurs, de quelle façon ses mémoires ont enrichi le *Bulletin* de la Société. De 1861 à 1870, c'est ce *Bulletin* qui a bénéficié presque exclusivement de tous ses travaux. Je citerai les suivants :

1° *Des Passages de Mercure sur le disque du soleil, et du passage de 1861 en particulier ;*

2° *Des Passages de Vénus sur le disque du soleil, et du passage de 1874 en particulier ;*

3° *Éloge historique de M. le professeur Sarrus ;*

4° *De la Position géographique de Strasbourg.*

Mais là ne se borne pas l'œuvre scientifique de notre regretté collègue. Les publications dont voici les titres, en s'ajoutant aux précédentes, disent hautement quels étaient son érudition et son talent :

1° *Sur la Pile hexagonale* (*Nouv. Ann.*, 1845);

2° *Sur le Calcul des sinus* (*Ibid.*, 1853);

3° *De l'Intégralité des fonctions différentielles d'un ordre supérieur au premier* (en collaboration avec Stoffel) [Liouv., 1862];

4° *Des Passages de Vénus sur le disque du soleil* (*Ann. de l'École normale*, 1869);

5° *Calcul des éclipses de soleil par la méthode des projections* (1860);

6° *Traité des surfaces du second ordre* (en collaboration avec Saint-Loup, 1859);

7° *Intégration par les séries de l'équation* $y'' - \frac{n-1}{x} y' = y$ (*Ann. de l'École normale*, 1874).

Si M. Bach a bénéficié de la retraite aussitôt qu'il l'a pu, jamais il ne s'est désintéressé de la science ni de l'enseignement. Assidu à nos séances, y prenant souvent la parole, continuant ses recherches personnelles, cherchant de mille façons à se tenir au courant des progrès incessants des mathématiques, le doyen honoraire n'a jamais cessé d'être des nôtres. Il aimait profondément la Société des sciences, à la prospérité de laquelle il avait pris une part si active, et c'est seulement depuis peu, qu'en raison de son état de santé, il avait dû renoncer à assister régulièrement à nos réunions.

La bonté et la modestie étaient les traits dominants de son caractère. Il était plein de cette bonhomie aimable qui commande l'estime et le respect. Il fallait voir avec quelle joie affectueuse il accueillait, au 1er janvier, les vœux de ses anciens collègues ! C'était vraiment une fête de famille, et on ne se séparait qu'après avoir échangé les marques de la plus sincère affection.

Sa mémoire restera chère à tous ceux qui l'ont connu, élèves, collègues ou amis, et nous aimerons à nous rappeler toujours l'homme de bien, le savant professeur, qui, par ses travaux, a tant contribué à la fondation définitive et au développement de notre Société.

COMMUNICATIONS.

I. **Chimie.** — M. Klobb fait connaître les résultats de ses recherches sur l'*action de l'ammoniaque sur les permanganates métalliques*.

L'auteur a obtenu une nouvelle série de composés en traitant par le permanganate de potasse les sels de certains métaux en solution ammoniacale. Il suffit de mélanger à froid des solutions suffisamment concentrées pour que le sel se précipite immédiatement sous forme d'une poudre cristalline.

Les analyses faites sur le sel d'argent lui assignent la composition

$$2\,(MnO^4Ag) + 2\,H^2O + 3\,AzH^3.$$

Les autres composés analogues qui ont été préparés jusqu'ici sont ceux de : cuivre, cadmium, nickel, zinc, magnésium. En outre, le chlorure lutéocobaltique $CO^2Cl^6 + 12\,AzH^3$ donne aussi, avec le permanganate de potasse, un précipité de permanganate lutéocobaltique.

Ces corps cristallisent très facilement et sont fort solubles dans l'eau. Ils sont peu stables. Abandonnés à eux-mêmes, ils se décomposent au bout d'un temps plus ou moins long, en perdant de l'ammoniaque. Ils détonent par la chaleur ainsi que sous le choc du marteau.

Les sels alcalino-terreux et ceux dont les oxydes ne sont pas solubles dans l'ammoniaque donnent un résultat négatif.

En particulier, il n'a pas été possible d'obtenir le composé de plomb. L'auteur ayant d'abord cherché à préparer du permanganate de plomb, ne put obtenir ce sel. En effet, quand on fait digérer du permanganate d'argent avec du chlorure de plomb, la solution filtrée ne renferme plus que de l'acide permanganique.

L'analyse de ces différents corps fera l'objet d'une communication ultérieure.

II. **Botanique.** — M. Fliche entretient la Société d'un *voyage botanique en Corse*. Ce n'est point un travail complet qu'il a l'intention de présenter, mais bien de simples notes comme il l'a déjà fait pour d'autres parties de la région méditerranéenne dont il poursuit l'étude. La Corse présente un grand intérêt à ce point de vue; isolée du continent, rapprochée de la Sardaigne, elle présente un grand nombre de plantes endémiques spéciales ou communes à l'île voisine. Elle présente des altitudes considérables, atteignant environ 2,700 mètres, en sorte qu'on peut étudier facilement la superposition des zones de végétation. Enfin, la plus grande partie du sol n'étant pas cultivée, la végétation spontanée a persisté beaucoup plus facilement qu'ailleurs. Quand elle existe, la culture est la même que dans la région des oliviers en France, avec cette différence que le climat étant plus chaud, plus égal, certains végétaux sont communs et réussissent très bien, qui, sur le continent, sont rares ou donnent des produits inférieurs. Tels sont les orangers et les cédratiers. Ces derniers constituent une richesse pour la portion de l'arrondissement de Calvi connue sous le nom de Balagne, qui est la seule région bien cultivée de l'île; la vigne se développe beaucoup dans l'arrondissement de Sartène, mais le phylloxéra l'a fait presque complètement disparaître des autres arrondissements, de celui de Corte en particulier, où elle donnait d'excellents produits et en assez grande quantité.

Le relief de l'île est très âpre : sur le versant occidental, les montagnes tombent en général d'une façon abrupte dans la mer; sur le

versant oriental, il y a place à leur pied pour une plaine alluviale et on rencontre sur le bord de la mer des plages sableuses qui font en général défaut à l'ouest. Il y a aussi une grande différence de constitution géologique entre les deux versants : à l'ouest, les granits, à gros grains en général, sont prédominants; à l'est on trouve des roches plus variées, parmi lesquelles quelquefois des calcaires. On trouve aussi des roches formées pour une part notable de carbonate de chaux et appartenant aux terrains tertiaires au sud de l'île, à Bonifacio, et au nord, à Saint-Florent. Partout où cet élément se rencontre, la flore se modifie, en sorte qu'il faut ici comme sur le continent renoncer à l'idée émise par Thurmann relativement à la prétendue similitude, dans le Midi, de la flore des terrains calcaires et de ceux qui ne le sont pas. Sans discuter les causes qui ont amené ce résultat, on peut affirmer que les différences sont aussi prononcées sur les bords de la Méditerranée que dans le Nord.

On peut, en dehors des cultures, reconnaître un certain nombre de divisions naturelles dans la flore de la Corse : celles des plages sableuses des bords de la mer, des pâtures inférieures et maquis, des forêts et des pâturages supérieurs s'étendant de la limite supérieure des forêts aux cimes les plus élevées. Celle-ci a été à peine étudiée, parce qu'au mois de mai, époque du voyage, elle était encore presque complètement couverte de neige. Il a été facile de constater qu'elle s'est constituée en partie aux dépens des forêts dont la limite supérieure tend à s'abaisser constamment sous l'influence néfaste des bergers, et aussi que la flore en est constituée, comme cela est général dans l'île, par des espèces identiques à celles du continent, le *Corydalis fabana*, par exemple, entièrement semblable à celui qu'on rencontre chez nous dans les escarpements du Hohneck, et des espèces spéciales, telles que les *Thlaspi rivale* et *Lepidium humifusum*, qui parfois couvraient le sol. Les plages aussi présentent ce phénomène d'une façon remarquable. Quant au maquis, Grisebach a été parfaitement dans le vrai en y voyant non un type spécial à la Corse, mais l'analogue des autres végétations arbustives qui ont reçu des noms spéciaux dans tous les pays méditerranéens. Il semble même qu'il faille le considérer comme le sous-bois persistant seul de forêts qui ont été ruinées par l'homme. On voit toutes les transitions entre le maquis le plus pur et la forêt normale. Cultivé, puis abandonné à lui-même, le sol qui porte le maquis le voit se reconstituer; mais une seule espèce, le *Cistus Monspeliensis*, couvre d'abord le sol; ce n'est ensuite qu'à la longue qu'on voit reparaître les autres espèces, myrtes, lentisques, etc.

Les forêts sont constituées par des angiospermes (bois feuillus des forestiers) et des gymnospermes (conifères ou résineux). Les premiers sont essentiellement pour la région inférieure, le chêne yeuse et le

chêne-liège; le hêtre pour la région tout à fait supérieure, c'est lui qu'on rencontre le dernier, à condition toutefois que l'altitude soit assez forte pour que la neige persistant longtemps l'irrigation soit suffisante pendant les mois d'été. Aux basses altitudes, ce sont, comme il vient d'être dit, les chênes à feuilles persistantes qui dominent; le chêne rouvre est très rare et manque souvent complètement. Ce n'est guère qu'au bord des cours d'eau qu'on rencontre des espèces à feuilles caduques : ormes, peupliers, aunes et saules en abondance, ce qui forme, lorsqu'on regarde le pays d'un point qui permette de l'embrasser sur une grande étendue, des cordons d'un vert clair au milieu du vert sombre de la forêt et des maquis. Le chêne yeuse se présente sous forme d'arbres de futaie souvent de fort belles dimensions; le chêne-liège, encore commun à Porto-Vecchio en particulier, quoiqu'il ait eu beaucoup à souffrir de la négligence des habitants, a pris une grande valeur, il est devenu une source de richesse pour les propriétaires qui en possèdent, mais il y a peu de jeunesse pour remplacer les vieux arbres. Les conifères, contrairement à ce qu'on observe en Provence, en Languedoc et en Italie, sont très rares aux basses altitudes, c'est à peine si l'on rencontre quelques arbres isolés et quelques bouquets de pin pinier (*P. pinea*) et de pin maritime (*P. pinaster*), le premier exclusivement sur la côte orientale; mais à partir de 800 mètres on voit apparaître en abondance le pin maritime et presque immédiatement le pin laricio qui devient prédominant, puis existe seul ou se mélange de sapin et de hêtre. Le pin maritime a une très belle forme, il atteint de fort belles dimensions, il est supérieur à ce qu'il est sur le continent, mais il est inférieur comme importance forestière au pin laricio, la grande essence de la Corse. Celui-ci constitue encore des forêts presque vierges, dans lesquelles on trouve des arbres de quatre, cinq et même six siècles restés en très bel état de végétation, mais toutes les forêts ne sont pas aussi riches. On a admis pendant trop longtemps un principe essentiellement faux, étant donnée la faible valeur du bois avant les transports faciles, c'est que la forêt doit payer la dépense des chemins établis pour son exploitation; il en est résulté parfois qu'il n'y a plus rien à faire passer sur la route quand celle-ci a été construite. Le bois de laricio, lorsqu'il a crû en massifs, est d'excellente qualité, mais il a le défaut de ne constituer que tardivement du bois parfait, ce qui oblige à le laisser très longtemps sur pied, au moins 250 ans. Ces bois sont achetés surtout par des commerçants italiens. Sans entrer dans des détails spécialement forestiers sur cette espèce, on peut dire que ce n'est point un arbre de pleine lumière. Sous ce rapport, G. Heyer a été le seul parmi les auteurs forestiers français ou allemands qui ait vu la vérité. Le sapin, identique à celui de nos montagnes de France, donne un bois de qualité supérieure, mais il perd tous les jours de son importance, parce que, placé surtout vers la limite de la

forêt, il souffre plus que tous les autres arbres, sauf le hêtre, des dommages qui ont été rappelés plus haut.

L'endémisme des plantes corses présente des problèmes de grand intérêt; il est d'ailleurs fort inégal non seulement parce que, cela a déjà été dit, certaines plantes spéciales sont communes à la Corse et à la Sardaigne, mais encore parce que tantôt les formes spéciales sont fort différentes de celles qu'on rencontre ailleurs, tandis que d'autres sont presque semblables, constituant de simples variétés. Il en est même qui sont indiquées dans les flores et qui sont purement fictives, l'*Alnus suaveolens*, par exemple, qui ne diffère pas de l'*A. viridis* des Alpes.

La végétation de la Corse présente souvent beaucoup d'analogie, non seulement par les espèces qui la constituent, mais par l'aspect et le beau développement des individus, avec ce qu'on observe dans la partie de l'Italie qui a été l'objet, l'année dernière, d'une communication de M. Fliche à la Société. L'humidité assez fortement retenue par les roches dans les deux pays, au moins au printemps, paraît exercer ici une grande action.

Le Secrétaire annuel,
M. F. THOUVENIN.

Séance du 2 décembre 1885.

Présidence de M. FLOQUET.

Membres présents : MM. Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bleicher, Blondlot, Charpentier, Chevalier, Dumont, Fliche, Floquet, Friant, Godfrin, Guntz, Gross, Haller, Hecht, Kœhler, Le Monnier, Millot, Schlagdenhauffen, Stoeber, Thomas, Thouvenin, Viller, Vuillemin.

COMMUNICATION.

Physique. — M. R. BLONDLOT présente à la Société un instrument auquel il a donné le nom de *multiplicateur électrométrique*. Cet instrument est destiné à reconnaître l'existence et le signe de très petites quantités d'électricité ; le principe sur lequel il repose consiste à multiplier la charge donnée par un procédé analogue à celui par lequel on multiplie, à l'aide d'un électrophore, la charge une fois donnée au gâteau de résine de celui-ci. La charge ainsi multipliée devient appréciable à l'aide d'un des électromètres connus. Grâce à un *compensateur* particulier, annexé à l'appareil, on annule préalablement les charges spontanées qui peuvent exister sur les pièces de l'appareil par suite de leur hétérogénéité.

A l'aide de cet instrument, on peut constater une différence de potentiel de Daniell 0,002 ; son avantage spécial est la petitesse de sa capacité : elle est tellement réduite qu'elle peut accuser l'existence d'une charge moindre que le $\frac{1}{100,000,000,000}$ de la plus petite charge visible dans l'électromètre capillaire.

Le Secrétaire annuel,
THOUVENIN.

Séance générale annuelle du 16 décembre 1885.

Présidence de M. Floquet.

Membres présents : MM. Bagnéris, Barthélemy, Bertin, Bichat, Bleicher, Blondlot, Brunotte, Charpentier, Chenu, Dumont, Fliche, Floquet, Friant, Haller, Hasse, Hecht, Held, Henri, Herrgott père, Klobb, Le Monnier, Macé, Millot, Prenant, Riston, Schlagdenhauffen, Thomas, Thouvenin, Volmerange, Vuillemin.

Messieurs,

Cette fois encore, l'année ne finit pas sans que la mort soit venue parmi nos membres titulaires. C'est M. Bach, doyen honoraire des Facultés des sciences de Strasbourg et de Nancy qui, cette année, manque à notre réunion. Dans une séance précédente, j'ai essayé de rappeler les talents, les services, les qualités si sympathiques de notre dévoué collaborateur. Aujourd'hui, j'ai voulu seulement redire ce nom qui a brillé si souvent dans les Annales de notre Société.

D'autres vides, dus à des causes moins cruelles, se sont produits dans nos rangs. MM. Laviéville, Lecat, professeurs au lycée, et M. Gény, inspecteur adjoint des forêts, ont dû nous quitter par suite de changements de résidence. Un autre membre titulaire a démissionné, ce qui porte à 5 le chiffre de nos pertes. Mais de nouvelles et importantes recrues sont venues rétablir et au delà le nombre des titulaires. Neuf membres nouveaux ont été admis en 1885, de façon que notre total, qui était de 57 au 1er janvier dernier, se trouve élevé actuellement à 62. Ajoutons que le nombre des membres associés s'est accru de deux unités, ce qui le porte à 22, et que nous avons en outre 51 membres correspondants nationaux et 26 membres correspondants étrangers.

Un illustre savant, publiant dernièrement ses recherches dans une grande revue scientifique française, écrivait ces mots placés en tête de son travail : « Ces recherches ont déjà été publiées, ou plutôt *enterrées* par extrait dans les mémoires de la Société des sciences de X. J'ose espérer que cette *exhumation* sera accueillie avec faveur par quelques-uns de nos lecteurs. » Je n'ai pas à défendre la Société en question contre ces accusations funèbres. Cette Société, avec laquelle nous avons tenu essentiellement à être en bonnes relations, est, Dieu merci ! assez vivante pour répondre elle-même, si bon lui semble. Mais comme toutes les associations scientifiques de province sont un peu solidaires les unes des autres, comme, vues des hauteurs de Paris, elles ne paraissent pas à tous les yeux avec leur véritable altitude, il est bon d'affirmer notre vitalité et de déclarer ici que notre Revue n'a rien de souterrain. Le *Bulletin* est en effet distribué à 95 Sociétés savantes,

françaises et étrangères, qui échangent avec nous leurs publications, si bien que le pauvre local de notre bibliothèque ne peut plus suffire. Des mesures récemment adoptées ont en outre largement favorisé le tirage à part. Il en résulte une publicité réelle et vraiment vaste, que chaque auteur peut encore étendre à sa guise à l'aide du tirage spécial. Nous nous réservons d'ailleurs, lorsque le besoin s'en fera sentir, d'adjoindre à notre *Bulletin* une publication indépendante de mémoires, reprenant ainsi une ancienne tradition de nos devanciers, qui n'a pas peu contribué à leur donner du renom. Grâce à l'habile administration de notre dévoué trésorier, M. Friant, grâce à la subvention que le conseil municipal veut bien nous accorder, la situation financière est assez satisfaisante pour nous le permettre en temps opportun.

Et quoi de moins surprenant, Messieurs, qu'une Société des sciences soit florissante à notre époque? La science, sous toutes ses formes, a-t-elle jamais été cultivée avec plus de succès que de nos jours? N'est-ce pas dans ce siècle, et surtout dans sa seconde moitié, que les mathématiques ont pris cet essor incomparable? N'est-ce pas d'hier que datent ces grandes idées sur la nature des agents physiques, sur leur corrélation, sur les transformations du travail mécanique? N'est-ce pas de notre temps qu'a vécu Darwin? Et que de découvertes grandioses! Ici on analyse les astres à l'aide de leur spectre; là on fixe leurs images par la photographie. Ici on liquéfie les gaz permanents, on fait la synthèse des corps organiques; là on atténue les virus. Qui n'a présente à l'esprit cette mémorable séance de l'Académie des sciences, du 26 octobre dernier, où l'on apprenait d'une part la guérison de la rage, et de l'autre le transport électrique de la force! N'assistons-nous pas à l'avènement définitif de l'électricité qui hier transmettait notre écriture, qui transmet aujourd'hui notre voix, et qui demain va transmettre la force motrice? Et que de grands travaux entrepris, que de recherches fécondes exécutées de nos jours, depuis l'étude des hautes régions de l'air par les météorologistes, jusqu'aux explorations du fond de la mer par le *Challenger*, le *Travailleur*, le *Talisman*! Et ces régions atmosphériques, ne va-t-on pas les parcourir dans un ballon dirigeable à volonté?

Dans quelques mois, Messieurs, l'Association française pour l'avancement des sciences doit se réunir à Nancy. Les membres résidents ont nommé un comité provisoire présidé par notre honorable collègue M. Bleicher, et chargé de l'organisation du congrès. La ville de Nancy a déjà pris des mesures spéciales en vue de recevoir dignement ses hôtes. La Société des sciences s'est aussi préoccupée de la question. Assurément, elle sera en bonnes mains pour remplir le rôle que vont lui imposer les circonstances. Le zèle éclairé, le dévouement incessant de M. le secrétaire général Hecht, qui depuis tant d'années déjà facilite tout dans notre tâche; la personnalité de mon savant successeur,

M. Schlagdenhauffen, sont de sûrs garants que notre Société saura faire honneur à ses traditions.

Ce n'est certes pas le local de notre bibliothèque que nous prodiguerons ! Ce ne sont même pas nos laboratoires ! Car si quelques membres du congrès, poussés par une curiosité bien probable, étendent leurs excursions au delà du grès vosgien, sur cette belle et riche plaine qui vit naître notre Société, ils devraient faire de trop pénibles comparaisons. Mais, ce que nous nous efforcerons de produire, ce sont les appareils ingénieux qui ont été disposés sur cette table, ce sont les théories qui ont été expliquées devant ce tableau, ce sont toutes les communications intéressantes qui ont été faites dans cette salle. Que toutes ces expériences, qui ont vu le jour à Nancy, soient réinstallées ! Que toutes ces études sur la flore, la géologie locales puissent être développées ! Que nos documents de météorologie lorraine soient coordonnés ! Que nos nouveaux élus, eux aussi, prennent part à cette activité et produisent tout ce qu'ils tiennent certainement en réserve !

Voilà, Messieurs, quels sont nos désirs et nos espérances ! En les réalisant, nous n'aurons pas seulement la satisfaction d'avoir rempli notre tâche au congrès. Nous aurons en outre le plaisir d'avoir donné une nouvelle impulsion à notre Société, et d'avoir fait quelque chose de plus pour cette Science, où tout est progrès, harmonie et bienfait.

COMMUNICATIONS.

I. **Botanique.** — M. Vuillemin fait une communication sur les *applications taxinomiques de l'anatomie végétale.*

Après avoir rappelé la supériorité des caractères anatomiques qui ont pour base l'*homologie* sur les caractères physiologiques reposant sur de simples *analogies,* l'auteur applique cette donnée à l'anatomie des *Muscinées* et signale entre leur sporogone et la tige des plantes vasculaires des relations plus intimes qu'on ne l'admet généralement. Dans toutes les espèces suffisamment élevées, on ne distingue pas seulement les trois régions essentielles de la tige (épiderme, écorce, cylindre central), mais on reconnaît des régions secondaires, comme un *péricycle* qui donne naissance aux spores, et un *endoderme* formé dans l'écorce au contact de cette région différenciée.

La tige feuillée des Mousses et des Hépatiques s'éloigne par sa structure de celle des plantes vasculaires dont elle est seulement l'analogue.

M. Vuillemin examine ensuite les applications de l'anatomie à la détermination spécifique. Les caractères anatomiques ont une fixité inégale dans les familles en groupes et les familles par enchaînement. Tel caractère, constant dans les premières, sera erratique dans les secondes. On évitera donc une généralisation prématurée des résultats obtenus par l'étude d'un groupe isolé. On voit, d'autre part, des caractères constants perdre leur netteté dans des cas particuliers, par suite d'un arrêt

ou d'une accélération de développement. Un caractère anatomique isolé ne nous renseigne donc pas d'une façon plus précise sur les relations des végétaux qu'un caractère d'ordre différent. Dans leur ensemble, au contraire, les caractères anatomiques constituent, au point de vue taxinomique, un puissant moyen de contrôle. Les exceptions n'en infirment point la rigueur, mais engagent à les manier avec prudence. Les causes d'erreur étant proportionnelles à la délicatesse des procédés, les moyens d'investigation les plus simples seront toujours les plus fidèles dans les mains insuffisamment exercées. La méthode anatomique n'a donc pas pour but de se substituer aux procédés vulgaires de détermination, mais seulement de leur assurer une base plus certaine en établissant sur des données rigoureuses la parenté réelle des divers types.

II. **Météorologie.** — M. Millot donne le résultat de ses observations sur le *cyclone du 3 juin 1885 à Aden et la perte du* Renard.

Le cyclone du 3 juin 1885 à Aden a surpris toutes les personnes qui connaissent le régime des vents au-dessus de la mer des Indes. Ce n'est guère qu'à la fin de la mousson de S.-O., quand la circulation atmosphérique se renverse, c'est-à-dire en octobre, que soufflent les tempêtes au nord de l'équateur. Or le tourbillon dans lequel a sombré le *Renard* a eu lieu à une époque où la mousson de S.-O., bien établie, souffle avec une grande régularité. De plus, les cyclones de la mer d'Oman cheminent généralement le long de la chaîne des Ghâtes ; avant le 3 juin dernier, jamais le golfe d'Aden ni le sud de la mer Rouge n'avaient vu semblable phénomène. Si l'on joint à cela l'absence de tout indice de perturbation avant le départ d'Obock, on comprendra que l'idée d'une tempête tournante n'a pu entrer dans l'esprit du capitaine du *Renard* à l'approche du mauvais temps. Il y a dès lors tout lieu de supposer qu'il n'a pas manœuvré comme on doit le faire en pareil cas : le malheureux navire a donc couru, sans le savoir, à une perte certaine.

Le centre du météore a dû passer sur Aden ou excessivement près de cette ville. La corvette anglaise *Bacchante* en a beaucoup souffert et a couru de grands dangers. Les récits des journaux ont permis de se faire une idée des dimensions du tourbillon, de sa violence et de la route qu'il a suivie.

Deux jours auparavant, le même cyclone avait été rencontré par d'autres navires au milieu de la mer d'Oman. En coordonnant toutes les informations qu'il a pu recueillir dans la presse, M. Millot a pu reconstituer deux tronçons de la trajectoire de ce terrible météore : l'un, au milieu de la mer d'Oman, dirigé de l'E.-S.-E. à l'O.-N.-O. et dans une position un peu plus méridionale que la route des navires qui vont d'Aden à Ceylan ; l'autre à Aden même, dirigé du N.-E. au S.-O. En ce point, la tempête devait avoir environ 55 kilomètres de diamètre ; elle se dépla-

cait avec une vitesse de 14 kilomètres à l'heure, mais sa vitesse de rotation a été évaluée à 150 kilomètres à l'heure, soit 41 à 42 mètres à la seconde. Quant au sens du tourbillonnement des masses d'air, c'est celui qu'on constate invariablement au nord de l'équateur.

III. Chimie. — M. Haller. *De l'Influence du milieu sur le sens des réactions. Action de la potasse en solution dans l'alcool absolu sur l'urée et la sulfo-urée.*

Un des modes de formation de l'urée consiste à traiter du cyanate de potasse par du sulfate d'ammoniaque dissous dans l'eau, à évaporer la solution et à reprendre le résidu par l'alcool qui dissout l'urée et laisse le sulfate de potasse. Cette synthèse organique, la première en date, a été faite par Wœhler en 1829. Dans cette réaction, il devrait se former, suivant les lois de la double décomposition, du cyanate d'ammoniaque, mais ce corps, après s'être formé, s'isomérise dans le cours des manipulations et devient de l'urée. Celle-ci diffère de son isomère en ce que, chauffée avec une solution aqueuse de potasse, elle fournit, non pas du cyanate de potasse et de l'ammoniaque, mais du carbonate de potasse et de l'ammoniaque :

$$CO\,Az^2H^4 + 2KHO = CO^3K^2 + 2AzH^3$$

dans un milieu d'où il a été jusqu'à présent impossible de faire la réaction inverse et de remonter au cyanate de potasse dont Wœhler est parti pour faire sa synthèse.

Dans le cours de recherches relatives à d'autres corps voisins de l'urée, il nous est arrivé d'employer de la potasse en solution alcoolique au lieu de potasse aqueuse, et nous avons constaté que la réaction se faisait dans un autre sens que celle attendue.

Nous avons répété le même essai avec l'urée en substituant l'alcool à l'eau et nous avons réussi à le transformer en cyanate de potasse suivant l'équation :

$$CO\,Az^2H^4 + KHO = CAzKO + AzH^3 + H^2O.$$

Cet essai a été fait, non seulement avec l'urée artificielle, mais encore avec l'urée retirée des urines. Cette opération inverse est une preuve de plus de l'identité des deux urées.

On a fait une expérience analogue avec la sulfo-urée qui a fourni du sulfocyanate de potasse et de l'ammoniaque. Mais cette transformation est partielle seulement ; d'autre part, la sulfo-urée chauffée seule à 160°-170° s'isomérise en sulfocyanate d'ammoniaque.

Le Secrétaire annuel,
Thouvenin.

RECHERCHES SUR LES FORMES

DE LA

CONTRACTION MUSCULAIRE

ET

SUR LES PHÉNOMÈNES D'ARRÊT

Par H. BEAUNIS

PROFESSEUR DE PHYSIOLOGIE A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY

Quand on examine la constitution anatomique de l'arc réflexe, on trouve successivement les parties suivantes, en allant du muscle à la surface sensitive, peau ou muqueuse (*fig.* 1) :

1 le muscle,
2 le nerf moteur,
3 la racine motrice,
4 le centre nerveux, moelle et encéphale,
5 la racine sensitive,
6 le ganglion de cette racine,
7 le nerf sensitif,
8 la surface sensitive.

Fig. 1. — Schéma de l'arc réflexe.

La contraction musculaire peut être déterminée *expérimentalement* par l'excitation de chacun de ces huit éléments de l'arc réflexe.

Pour désigner ces différentes espèces de contraction, j'emploierai les termes abréviatifs que représente le tableau suivant :

A. *Contraction directe,* par excitation directe :
— Du muscle : *Contraction musculo-directe;*
— Du nerf moteur : *Contraction névro-directe;*
— De la racine motrice : *Contraction radico-directe.*

B. *Contraction centrale,* par excitation des centres nerveux :
— *Contraction médullaire, bulbaire, encéphalique.*

C. *Contraction réflexe,* par excitation :
— De la racine sensitive : *Contraction radico-réflexe;*
— Du ganglion : *Contraction ganglio-réflexe;*
— Du nerf sensitif : *Contraction névro-réflexe;*
— De la périphérie sensitive : *Contraction périphéro-réflexe* (*Contraction cutanéo-réflexe, cardio-réflexe,* etc., suivant le point de la périphérie sensitive excité).

Le but de ce travail est d'examiner si la contraction musculaire est la même comme forme dans chacun de ces modes d'excitation, ou bien si, suivant le lieu de l'excitation, la contraction musculaire change de caractère.

J'étudierai d'abord la contraction directe, puis la contraction réflexe et en dernier lieu seulement la contraction centrale provoquée ou volontaire. Cette étude une fois faite, j'essaierai d'appliquer les résultats obtenus à l'interprétation des phénomènes, tant de la contraction musculaire proprement dite que de l'innervation générale.

Il semble au premier abord qu'après tant d'études faites sur la contraction musculaire, la question doive être épuisée; il n'est peut-être pas en effet de physiologiste qui n'ait touché plus ou moins à cette question. Il n'en reste pas moins beaucoup à faire et spécialement, comme on le verra plus loin, la question de la contraction réflexe est encore à peine ébauchée. Des faits et des plus importants ont échappé en grande partie à l'attention des expérimentateurs, et ce sont surtout ces faits que je voudrais mettre en lumière. Au lieu de borner ce travail à quelques points spéciaux, j'ai cru préférable de faire une sorte d'étude d'ensemble de la forme de la contraction musculaire; je m'exposais ainsi à des redites et j'étais obligé de revenir sur des points parfaitement connus; mais ce mode de procéder permet de mieux saisir les différences de forme de la contraction musculaire suivant le lieu de l'excitation. D'ailleurs, je n'ai fait que rappeler brièvement

les faits déjà étudiés et devenus classiques, réservant les développements pour les faits nouveaux ou jusqu'ici incomplètement étudiés. Même avec ces restrictions, le cadre que je m'étais tracé est tellement vaste que j'ai été obligé de le restreindre encore en laissant de côté certains points sur lesquels je n'avais que des expériences insuffisantes ou sur lesquels je n'avais pu faire de recherches.

Chemin faisant, j'ai touché à certaines questions un peu en dehors de mon sujet, mais sur lesquelles mes expériences me fournissaient quelques résultats intéressants. Enfin, j'ai été amené par ces recherches à étudier des phénomènes se rattachant à la physiologie générale de la substance nerveuse et spécialement les phénomènes d'arrêt. C'est cette étude des actions d'arrêt qui termine ce travail.

J'ai joint à ce mémoire un grand nombre de tracés graphiques choisis parmi ceux que j'ai recueillis ; j'aurais voulu les multiplier encore, mais il est une limite devant laquelle j'ai dû m'arrêter. Quant aux procédés expérimentaux employés, ils sont maintenant tellement connus depuis les travaux, devenus classiques, de Marey et de ses élèves, que je n'ai pas cru utile d'y insister. Je ne puis que renvoyer le lecteur à la méthode graphique de Marey, aux travaux du laboratoire du même auteur et à ma *Physiologie*[1].

Toutes les expériences relatées dans ce travail ont été faites sur la grenouille.

1. Je donnerai cependant quelques éclaircissements sur un point spécial. Dans un certain nombre d'expériences, j'ai employé, comme on le verra plus loin, l'appareil à glissement de Du Bois-Reymond, dont la disposition est bien connue de tous les physiologistes. L'appareil dont je me suis servi est gradué, en centimètres, de 0 à 40, 0 correspondant à la distance maximum (40 centimètres) des deux bobines et par suite à l'intensité minimum du courant induit, et 40 au rapprochement complet des deux bobines et par conséquent à l'intensité maximum du même courant. Mais les intensités du courant induit ne sont pas exactement en raison inverse de l'écartement des deux bobines. Si, en effet, on dresse la courbe du coefficient d'induction de l'appareil en fonction de la distance des centres des deux bobines, on voit que, à mesure que la bobine secondaire se rapproche de la bobine inductrice, l'intensité du courant induit croît d'abord lentement, puis plus vite, et enfin plus lentement pour arriver à son maximum. Les chiffres indiqués dans ce travail donnent donc, non pas le degré d'écartement des deux bobines, mais, avec les réserves faites ci-dessus, l'intensité d'action du courant induit.

PREMIÈRE PARTIE

DES FORMES DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE

A. — Contraction directe.

1° *Contraction musculo-directe.*

Quand on excite directement un muscle en plaçant, par exemple, une électrode à une extrémité du muscle et l'autre à l'autre extrémité, on excite en même temps les nerfs intramusculaires et les terminaisons nerveuses motrices, et le résultat est le même que si l'on excitait directement le nerf moteur; la contraction, secousse ou tétanos, a le même caractère et la même forme. Pour avoir les effets de l'excitation du muscle, indépendamment de toute intervention nerveuse, le meilleur moyen est de paralyser les plaques motrices terminales par le curare; dans ces conditions, la contraction est produite par l'excitation même du tissu musculaire. La curare modifie bien un peu, il est vrai, l'irritabilité musculaire, comme l'ont montré les recherches de Rosenthal et de Boudet de Pàris; mais, malgré cet inconvénient, il est facile de comparer la forme de la contraction musculo-directe du muscle curarisé à celle de la contraction musculo-directe du muscle intact, en faisant la part de l'action du curare. Pour ces expériences, il suffit de curariser l'animal en employant le procédé de Cl. Bernard (ligature d'un membre), pour garantir une des pattes de l'action du poison; les deux gastro-cnémiens sont fixés aux deux leviers d'un myographe double et les excitateurs bifurqués aboutissent d'un côté au muscle curarisé, de l'autre au muscle intact. On peut ainsi comparer facilement les deux tracés [1].

1. Dans cette expérience, il y a une cause d'erreur dont il faut être prévenu. Quand on fait la ligature d'un membre pour empêcher le poison d'agir sur les muscles de ce membre, on empêche en même temps l'abord du sang dans ces muscles, tandis que le sang continue à arriver dans les muscles du côté curarisé. Les muscles du membre lié deviennent rapidement plus durs et sont évidemment modifiés dans leur élasticité et dans leur irritabilité. Ces modifications sont plus prononcées quand on lie le membre en masse que quand on le lie en respectant le nerf. Dans le cas où le muscle est ainsi altéré dans ses propriétés, il faudrait, pour rendre l'expérience comparable, lier l'artère de la patte curarisée après s'être assuré que l'action du poison est complète. Il vaut mieux, en tout cas, rejeter les expériences dans lesquelles l'irritabilité du muscle non curarisé ne paraît pas normale.

La secousse musculo-directe du muscle curarisé se présente alors sous la forme de secousse musculaire classique, telle qu'on la trouve décrite partout. Seulement, si on la compare à la secousse musculo-directe du muscle intact ou à la secousse névro-directe, on voit (*fig.* 2) que, pour le muscle curarisé, le passage de la ligne d'ascension à la ligne de descente est plus

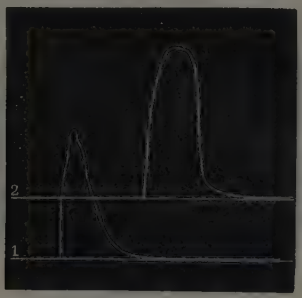


Fig. 2. — Secousse du muscle curarisé et du muscle intact[1].

arrondi, autrement dit, le muscle reste plus longtemps à l'état de contraction. Ce fait peut se voir aussi sur les tracés donnés par Boudet de Pâris (*Travaux du laboratoire de Marey,* 1878-1879, p. 147, fig. 32). Dans l'expérience de la figure 2, la contraction était produite par un seul choc d'induction de rupture; les secousses déterminées par la fermeture avaient du reste la même forme. Une chose à remarquer ici, c'est que la secousse du muscle curarisé a plus d'amplitude que celle du muscle intact. Ce fait se rattache-t-il à une irritabilité plus grande du muscle curarisé? Boudet, dans ses recherches, a toujours constaté, au contraire, une diminution d'excitabilité; mais, pour ma part, je ne saurais être aussi absolu, et si dans beaucoup de cas j'ai observé cette diminution, il en est d'autres et on en trouvera encore des exemples plus loin, dans lequel le curare augmentait l'irritabilité musculaire. Il faut aussi remarquer que tous les curares ne sont pas de même nature et que dans certains échantillons, à côté de l'action typique et classique se montre une action excitante qui peut, dans

1. Ligne supérieure, 2, muscle curarisé. — Ligne inférieure, 1, muscle intact. — Nota. A moins d'indication contraire, tous les tracés sont pris avec la vitesse minimum du cylindre enregistreur. Une seconde correspond à une étendue de 12 millimètres sur le tracé. Tous les tracés se lisent de gauche à droite.

certains cas, acquérir une intensité assez grande. Cette forme de la secousse du muscle curarisé se voit aussi bien, du reste, avec le courant constant qu'avec le courant induit.

Mais avec le courant constant, ce n'est qu'avec un courant *faible* qu'on observe une *secousse simple* à la fermeture du courant. Habituellement, après la fermeture, le muscle conserve un certain degré de raccourcissement qui disparaît à la rupture du courant, comme on le voit dans la figure 3. Il y a donc là un véritable téta-

Fig. 3. — Tétanos de fermeture ; muscle curarisé[1].

nos de fermeture qui a été bien étudié par Wundt. Quand le courant constant est assez intense, on observe aussi à la rupture une contraction (*fig.* 4); mais elle est toujours plus faible que la con-

Fig. 4. — Contraction de fermeture et de rupture; muscle curarisé.

traction de fermeture à moins que le courant ne soit très intense ; quelquefois même, comme on le voit dans la figure 4, cette con-

1. F, fermeture du courant. — R, rupture.

traction de rupture est suivie d'un raccourcissement permanent. Avec le muscle curarisé, le tétanos de fermeture s'observe aussi bien avec le courant descendant qu'avec le courant ascendant.

Avec l'extra-courant, les résultats sont les mêmes qu'avec les courants constants (*fig.* 5).

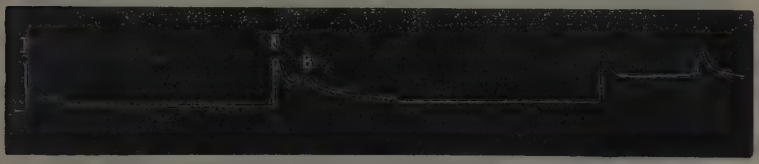


Fig. 5. — Contraction de fermeture et de rupture ; muscle curarisé[1].

Du reste, que l'excitation soit bipolaire ou unipolaire, le résultat est toujours le même.

Avec les chocs d'induction simples, la forme de la secousse musculo-directe est la même qu'avec les courants constants et cette forme est la même aussi pour la fermeture et pour la rupture. Seulement, à l'inverse de ce qui existe pour le courant constant, il n'y a jamais de tétanos de fermeture, quelle que soit d'ailleurs l'intensité du courant.

Le *tétanos musculo-direct* du muscle curarisé a la même forme, dans ses traits généraux, que le tétanos musculo-direct du muscle normal, sauf cependant quelques différences que je vais signaler.

Avec les courants induits (appareil de Du Bois-Reymond), le tétanos apparaît dans le muscle intact pour des courants qui ne produisent rien sur le muscle curarisé ; l'irritabilité de ce dernier serait donc diminuée, comme l'ont vu Boudet de Pâris et d'autres observateurs. Cependant, le fait doit, il me semble, être présenté autrement ; en excitant le muscle intact, on excite en réalité les nerfs intramusculaires, de sorte que le résultat de l'expérience précédente doit plutôt être formulé ainsi : le muscle (substance contractile) est moins excitable pour les courants induits tétanisants que les nerfs moteurs. Une fois obtenu, le tétanos du muscle curarisé présente les caractères suivants. D'abord, le raccourcissement persiste plus longtemps que dans le muscle intact

1. F, fermeture ; R, rupture. Excitations d'intensité croissante. La première excitation, la plus faible, ne détermine qu'une contraction de fermeture. Extra-courant.

après la cessation de l'excitation ; il met par conséquent plus de temps à revenir à sa longueur naturelle. En outre, si on continue l'excitation tétanisante, le raccourcissement tétanique persiste plus longtemps que dans le muscle normal, fait qui se trouve d'ailleurs en accord avec le précédent. Enfin, le tétanos musculo-direct du muscle curarisé ne présente pas ou ne présente qu'exceptionnellement, et alors à un degré beaucoup plus faible, la *contraction initiale* qui se montre au contraire souvent, tant dans le tétanos musculo-direct du muscle normal que dans le tétanos névro-direct.

Avec les *courants constants interrompus,* les phénomènes sont un peu différents. On pourra s'en rendre compte en examinant les figures 6 et 7 qui donnent les tracés pris dans une série d'expériences. Un muscle gastro-cnémien est curarisé, l'autre intact. On excite simultanément et par le même nombre d'interruptions, le muscle curarisé et le nerf du muscle intact.

Pour 6 à 7 interruptions par seconde, on a dans le muscle curarisé une série de secousses correspondant en nombre au nombre des excitations. L'excitation simultanée du nerf moteur du muscle opposé (excitation névro-directe) n'a rien produit (*fig.* 6).

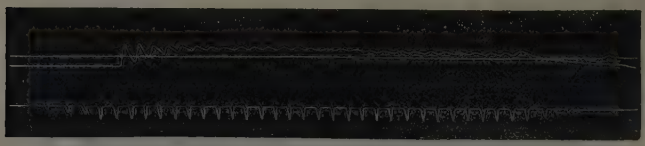


Fig. 6. — Tétanos incomplet du muscle curarisé [1].

La contraction névro-directe n'apparaît qu'à 8 interruptions par seconde. Pour 13 interruptions par seconde (*fig.* 7), la fusion des secousses est à peu près complète pour le muscle curarisé, 1 ; le tétanos névro-direct, au contraire, est encore très incomplet, 2 ; mais, en revanche, l'amplitude de ce dernier est bien supérieure. Enfin, un fait à noter, c'est la régularité des secousses du muscle curarisé qui contraste avec l'irrégularité relative des secousses non fusionnées du tétanos névro-direct.

1. Ligne supérieure ; ligne de contraction du muscle intact ; il n'y a qu'une très légère contraction après la cessation de l'excitation. Ligne moyenne ; ligne de contraction du muscle curarisé. Ligne inférieure ; elle indique le nombre des interruptions (les trois premières sont inefficaces et ne doivent pas être comptées). Courants constants faibles.

On voit par cette expérience que le muscle curarisé, à l'inverse de ce qui se produit pour les courants induits, est plus excitable que le muscle intact ou que le nerf moteur pour les courants

Fig. 7. — Tétanos comparés du muscle curarisé et du muscle intact[1].

constants faibles et que la fusion des secousses s'y produit plus rapidement.

On pourrait employer un autre moyen que le curare pour étudier la contraction musculo-directe. Ce serait de sectionner le nerf moteur et d'attendre pour essayer l'action des diverses excitations sur le muscle, la dégénérescence des plaques motrices terminales qui précède celle des fibres musculaires. Je n'ai pas fait jusqu'ici de recherches de ce genre.

J'ai essayé l'influence des *excitations mécaniques* (piqûres, chocs simples ou intermittents, sections, etc.) sur le muscle curarisé. Mais les mouvements imprimés au muscle par l'action mécanique se transmettent de proche en proche au tendon et au levier auquel il est rattaché, de sorte que, dans le tracé qu'on obtient, il est difficile de faire la part de la contraction due réellement à l'excitation et celle du mouvement communiqué. J'ai essayé d'arriver à un résultat en fixant solidement par des épingles la moitié supérieure du muscle en laissant libre sa moitié inférieure rattachée au levier du myographe; j'excitais alors par la piqûre ou tout autre moyen mécanique cette moitié supérieure; mais je ne suis arrivé à rien de précis avec cette disposition et n'ai pas continué ces expériences.

L'*excitation chimique* du muscle curarisé avec l'acide lactique

1. 1, ligne de contraction du muscle curarisé; 2, ligne de contraction du muscle intact. Les deux contractions ont commencé au même instant, seulement le levier inscripteur du muscle curarisé était plus long. Cette disposition se retrouvera dans la plupart des tracés suivants. Sur la ligne inférieure sont indiquées les interruptions du courant.

concentré donne un raccourcissement permanent, une véritable contraction, mais peu intense. L'acide était appliqué soit directement sur la surface du muscle mis à nu, soit dans une incision de façon que l'acide atteignît la coupe des fibres musculaires [1]. La même contracture, plus intense seulement, s'observe avec les acides minéraux, comme l'acide nitrique ou l'acide sulfurique. La figure 8 représente le tracé du tétanos déterminé par ce dernier

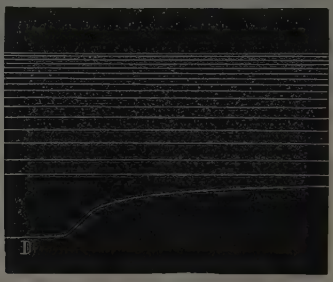


Fig. 8. — Tétanos chimique du muscle curarisé.

acide; il se produit d'emblée, sans secousse et s'accroît lentement; en effet, l'ascension du levier du myographe continue à se faire pendant plus de trente minutes, et le muscle reste à cet état de rétraction sans revenir à sa longueur primitive. Mais ce raccourcissement consécutif est plutôt une simple rétraction physique par coagulation de la myosine qu'un véritable tétanos.

Avec les acides étendus, je n'ai pas obtenu, en les appliquant directement sur le muscle, de contraction musculaire enregistrable par le myographe. Il m'a donc été impossible d'en étudier la forme.

2° *Contraction névro-directe.*

La contraction névro-directe, c'est-à-dire celle qui est produite par l'excitation directe du nerf moteur, a été étudiée par tous les physiologistes, et c'est à elle que se rattachent presque toutes les notions classiques sur la contraction musculaire. Quoique cette

1. Dans ce dernier cas, d'après Héring, la contraction pourrait être due au courant musculaire, comme quand on réunit par un arc conducteur la surface d'un muscle à sa coupe.

contraction soit aujourd'hui parfaitement connue et ait été analysée dans tous ses détails, j'en dirai cependant quelques mots, spécialement au point de vue de la forme de la contraction.

Cette forme doit d'abord être envisagée dans la *secousse simple* et pour en avoir une idée, il vaut mieux l'étudier à l'aide de tracés pris avec une certaine vitesse de rotation du cylindre enregistreur. Je crois inutile de donner ici des figures représentant les types principaux de secousse névro-directe. Ces types sont en effet bien connus et on les trouvera dans les mémoires spéciaux. La forme de la secousse est surtout influencée par la durée relative des deux périodes d'ascension et de descente. A ce point de vue, on peut distinguer les cas suivants: les deux périodes d'ascension et de descente sont égales ; la période d'ascension l'emporte sur la période de descente; la période de descente est plus longue que la période d'ascension, et c'est là du reste la forme la plus ordinaire. Enfin, dans certains cas, se montrent des oscillations consécutives qui dépendent de l'élasticité du muscle, en éliminant les causes d'erreur dues au levier même du myographe. Cette secousse névro-directe présente du reste une forme identique avec les courants constants, l'extra-courant, les décharges du condensateur et les courants induits de fermeture ou de rupture [1].

Quelquefois, mais beaucoup plus rarement que par l'excitation directe du muscle, on observe un tétanos de fermeture et plus rarement encore un tétanos de rupture. Ce tétanos de fermeture est bien moins intense que le tétanos de fermeture de la contraction musculo-directe. Quant au tétanos de rupture, il est très rare, à moins de continuer pendant longtemps l'excitation par le courant constant (tétanos de Ritter).

Quant à l'amplitude de la courbe, elle dépend en grande partie de l'intensité et du sens du courant. Sous ce rapport, j'ai constaté à plusieurs reprises l'exactitude des lois de Pflüger.

1. Pour étudier la *forme* de la contraction musculaire, il faut inscrire cette contraction sur des surfaces, plaques ou cylindres, animées d'un mouvement uniforme ; à ce point de vue, le cylindre enregistreur ordinaire, tel qu'il est habituellement employé en France depuis Marey, est un appareil excellent. Avec ses trois vitesses, il permet d'étudier, dans toutes les conditions possibles, la forme de la contraction. Il n'en est pas de même des appareils qui reposent sur le principe du mouvement accéléré, comme les myographes à ressort d'Helmholtz et de Fredericq, ou sur le principe du pendule, comme le myographe de Wundt. Ces appareils excellents pour étudier la durée des différentes périodes de la contraction, en faussent la forme et ne permettent pas de la saisir et de l'apprécier d'un coup d'œil comme avec les appareils à mouvement uniforme.

Les diverses formes de *tétanos névro-direct* ont été étudiées avec tant de détails par les physiologistes, que j'aurai peu de chose à en dire. On sait comment se fait la transition graduelle des secousses isolées et égales au tétanos parfait. Je ne m'arrêterai que sur quelques points.

Quand on excite un nerf moteur par des courants de piles interrompus, par exemple, en augmentant peu à peu la fréquence des interruptions, on observe les faits suivants qu'on peut voir sur les tracés des figures 9 à 13 pris comme types. Jusqu'à 8 excitations par seconde, les secousses sont parfaitement égales, isolées et leurs *faîtes* et leurs *bases* forment deux lignes horizontales parallèles que j'appellerai *ligne de faîte* et *ligne de base* (*fig.* 9).

Fig. 9. — Fusion des secousses; première phase.

A 8 excitations par seconde, la ligne de base commence à monter et devient oblique, mais elle reste encore droite (*fig.* 10), de façon

Fig. 10. — Fusion des secousses; deuxième phase.

que les secousses, qui décroissent régulièrement d'amplitude, sont inscrites dans un tronçon de triangle rectangle. A 10 excitations par seconde (*fig.* 11), la ligne de base prend la forme d'une courbe à concavité inférieure, courbe dont la concavité s'accentue

de plus en plus à mesure qu'augmente la fréquence des excitations (*fig.* 12). Dans ces conditions, la série des secousses se divise en

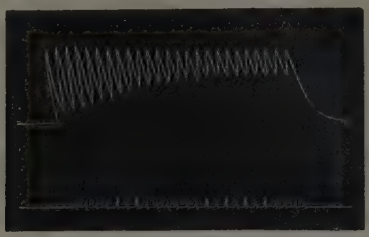


Fig. 11. — Fusion des secousses; troisième phase.

deux parties; les premières, diminuant graduellement d'amplitude, représentent un triangle plus ou moins allongé; les autres, égales

Fig. 12. — Fusion des secousses; quatrième phase.

entre elles, très petites, ont leur ligne de faîte et de base parallèles et sont inscrites dans une bande étroite qui se réduit bientôt à

Fig. 13. — Fusion complète des secousses; dernière phase.

une ligne de fines dentelures. Enfin, à 17 excitations par seconde la fusion des secousses est complète (*fig.* 13). On sait du reste

que cette fusion s'obtient pour un nombre moins fréquent d'excitations quand onprolonge longtemps l'excitation tétanisante; mais dans ce cas les premières secousses sont toujours isolées.

Le mode de fusion des secousses que je viens de décrire ne se présente pas toujours avec cette forme typique. Très souvent, après les premières secousses, les lignes de faîte et de base, au lieu de rester écartées, se rejoignent plus ou moins vite pour n'en former qu'une; le tétanos, incomplètement fusionné dans la première partie de la courbe, est complet dans la seconde; très souvent aussi ces deux lignes, au lieu de rester horizontales, présentent, surtout dans la première partie, une direction ascendante plus ou moins accentuée. Le tracé de la figure 14 donne un exemple de ces deux dispositions.

Fig. 14. — Fusion des secousses; forme ascendante.

Avec l'*extra-courant*, on retrouve les mêmes formes intermédiaires pour arriver au tétanos parfait; ainsi la figure 1, pl. XVII, représente un tétanos incomplet correspondant à 19 excitations par seconde; il en fallait 28 pour obtenir le tétanos parfait.

Il peut arriver, et cela m'a paru plus fréquent avec les courants induits et avec l'extra-courant qu'avec les courants constants, que la première et la dernière secousse ne soient pas égales aux autres; dans ce cas, elles peuvent être, soit plus hautes, soit plus faibles. J'aurai occasion de revenir plus loin sur ce fait.

Avec les *courants induits* de fréquence variant entre 6 et 30 excitations par seconde, les phénomènes sont à peu près les mêmes. La fusion des secousses s'opère entre 10 et 20 excitations par seconde, suivant l'intensité et la durée de l'excitation.

Les formes du *tétanos parfait* peuvent se ramener à quelques types fondamentaux. On sait qu'on peut obtenir d'emblée ce tétanos sans passer par la période des secousses incomplètement fusionnées, en excitant le nerf moteur par des chocs de fréquence

suffisante, par exemple avec la disposition ordinaire du trembleur de l'appareil à glissement de Du Bois-Reymond.

La courbe du tétanos parfait se compose de trois parties : la *ligne d'ascension,* le *plateau,* la *ligne de descente.* La brusquerie de l'ascension ou de la descente, la direction horizontale ou oblique du plateau, l'existence d'une contraction initiale ou terminale, la façon dont la ligne d'ascension se continue avec le plateau, celui-ci avec la ligne de descente et cette dernière avec la ligne de repos impriment à cette courbe des variations de forme bien connues sur lesquelles je n'insisterai pas. Ce sont là des notions classiques. Quelle que soit du reste la nature de l'excitation électrique (courant constant, courant induit, extra-courant, condensateur), quel que soit le procédé employé (excitation bipolaire ou unipolaire), la forme du tétanos n'en est pas modifiée. Les conditions qui font varier la forme de la contraction tétanique doivent plutôt être cherchées dans le nerf lui-même et dans ses variations d'excitabilité.

Dans certaines conditions, on rencontre au début du tétanos une contraction plus forte qu'on a appelée *contraction initiale.* Dans certains cas, beaucoup plus rares, on trouve une contraction semblable à la fin du tétanos; on peut l'appeler *contraction terminale.* Cette dernière a moins attiré l'attention des observateurs. Comme ces deux espèces de contraction peuvent servir à interpréter la forme du tétanos, je leur consacrerai un paragraphe spécial.

Pour en rechercher le mécanisme, au lieu de prendre le tétanos parfait, il vaut mieux prendre les secousses produites par des courants interrompus et non encore fusionnées. On voit alors que les premières et les dernières secousses peuvent être soit plus

Fig. 15. — Contraction initiale plus forte.

Fig. 16. — Contraction terminale plus forte.

fortes, soit plus faibles que les secousses intermédiaires. On peut ainsi rencontrer les combinaisons suivantes, telles qu'on les voit dans les tracés représentés dans les figures 15 à 22 : la contraction initiale est plus forte (*fig.* 15); c'est là le cas le plus fréquent

et le mieux étudié ; la contraction terminale est plus forte (*fig.* 16) ; les deux contractions, initiale et terminale, sont plus fortes (*fig.* 17) ; ce cas se présente rarement ; la contraction initiale est

Fig. 17. — Contractions initiale et terminale plus fortes.

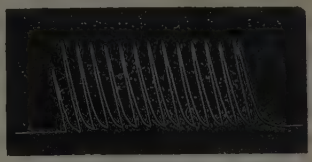


Fig. 18. — Contraction initiale plus faible.

plus faible (*fig.* 18) ; la contraction terminale est plus faible (*fig.* 19) ; les deux contractions initiale et terminale sont plus fai-

Fig. 19. — Contraction terminale plus faible.

Fig. 20. — Contractions initiale et terminale plus faibles.

bles (*fig.* 20) ; la contraction initiale est plus forte et la contraction terminale plus faible (*fig.* 21) ; la contraction initiale est plus faible et la contraction terminale plus forte (*fig.* 22).

Fig. 21. — Contraction initiale plus forte ; contraction terminale plus faible.

Fig. 22. — Contraction initiale plus faible ; contraction terminale plus forte.

Quelle peut être la cause de ces variations ? On a invoqué plusieurs conditions pour la production de la contraction initiale, sous la forme la plus ordinaire (*fig.* 15). On peut d'abord éliminer l'influence de la projection du levier qui peut, à la vérité, la produire dans certains cas, mais il y a là une cause d'erreur qu'il

est facile d'éviter avec un peu de soin et d'attention. L'intensité de l'excitation a une influence plus réelle; il est bien difficile en effet, quand on excite un nerf par une série de chocs électriques (courants constants, interrompus, courants induits, etc.), d'avoir des excitations d'intensité et de durée rigoureusement égales. Les appareils employés présentent toujours, quelque parfaits qu'ils soient, des irrégularités tenant, soit aux producteurs du courant eux-mêmes, soit au contact des interrupteurs. Ainsi, dans la figure 23, les irrégularités dans l'amplitude des secousses tiennent évidemment à cette cause. Mais la régularité des secousses dans les figures 15 à 22 prouve d'une façon évidente que, pour elles, ces causes ne peuvent être invoquées et il en est de même

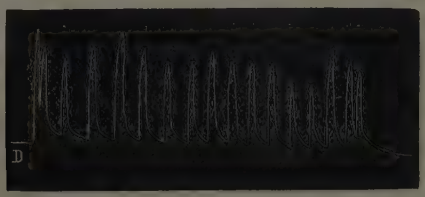


Fig. 23. — Secousses d'amplitude irrégulière.

certainement dans la plupart des cas. Il faut donc chercher ailleurs la raison de ces variations des secousses initiale et terminale.

On pourrait croire que la secousse initiale est un phénomène d'*addition latente* et, en effet, il peut en être ainsi dans certains cas. Mais dans les conditions expérimentales dans lesquelles je me suis placé pour les tracés 15 à 22, cette addition latente n'a pu se produire, car le nombre des secousses correspondait exactement au nombre des excitations. A mon avis, il faut chercher ailleurs l'interprétation de ce phénomène.

La première condition, sur laquelle a déjà, du reste, insisté Ch. Richet dans sa *Physiologie des muscles et des nerfs* (p. 120 et suivantes), c'est l'excitabilité même du nerf. Cette excitabilité subit des variations qui se produisent à des intervalles très rapprochés et sont soumises à des causes diverses qu'il est très difficile d'analyser. Le repos, la fatigue, les excitations antérieures, les conditions expérimentales multiples dans lesquelles le nerf est placé dans tel ou tel cas, sont autant de causes qui peuvent faire varier, soit en plus, soit en moins, cette excitabilité. Mais ceci n'explique pas comment il se fait que les variations des secousses se mon-

trent de préférence au début et à la fin de la série des excitations.

Pour expliquer le fait, il faut recourir à certains phénomènes généraux de l'excitation nerveuse. Quand une excitation isolée atteint un nerf moteur, une contraction se produit, ayant la forme d'une secousse simple, mais le nerf ne rentre pas immédiatement, une fois la secousse musculaire produite, dans son état antérieur ; il a subi, et les faits d'addition latente et de fatigue le démontrent, une certaine modification qui persiste plus ou moins longtemps, modification qui peut se traduire, suivant les cas, par une augmentation ou par une diminution d'excitabilité. Un nerf soumis à une série d'excitations *intermittentes* d'intervalle assez rapproché se trouve donc dans un état spécial *permanent* qu'on pourrait appeler *état d'excitation larvée,* qui commence avec le début des excitations et ne se termine qu'un certain temps après leur cessation. Le début et la fin de la série d'excitations constituent ainsi deux changements d'état *brusques,* tandis que dans l'intervalle il s'établit une sorte de régime régulier. Rien d'étonnant donc à ce que les secousses initiales et terminales se distinguent par certains points des secousses intermédiaires.

Mais une autre condition intervient encore, et c'est celle-là qui, à mon avis, joue un rôle essentiel. Toutes les fois qu'on excite un nerf, il se produit dans ce nerf deux sortes de modifications de sens contraire ; soit un nerf moteur, par exemple, il y aura dans ce nerf une mise en activité qui se traduira par une secousse du muscle ; mais, outre ce phénomène, le plus apparent et le mieux étudié, il se produit aussi un état contraire qui tendra à enrayer la secousse produite ou à l'empêcher de se produire. Il y aura *à la fois* dans ce nerf des actions motrices et des actions d'arrêt. Ce n'est pas ici le lieu de développer cette question qui sera étudiée plus loin avec les phénomènes d'arrêt. On verra là sur quels faits se base cette opinion ; je me contente ici de constater l'existence des deux espèces d'actions, toutes les fois qu'on excite un nerf moteur. Malheureusement, si les actions motrices ont été bien étudiées et sont connues aujourd'hui dans toutes leurs conditions de production, il n'en est pas de même des actions d'arrêt et l'on ne peut guère mentionner sur ce sujet que les expériences de Wundt, relatées dans ses *Untersuchungen zur Mechanik der Nerven und Nervencentren.* Ce qui est certain, c'est que la marche des processus d'arrêt est différente de celle des processus

d'activité et que si on pouvait dresser les courbes d'intensité des deux actions pendant toute la durée de l'excitation, les deux courbes auraient une forme différente et ne se superposeraient pas. En réalité, le mot *à la fois*, dont je me suis servi plus haut n'est pas absolument exact, en ce sens que ni le début, ni le point culminant, ni la fin des deux courbes ne coïncideraient. En général, le processus d'activité motrice débute *plus vite* que le processus d'arrêt et dure moins longtemps ; aussi ces phénomènes d'arrêt ne se montrent-ils pas dans la secousse simple, tandis qu'ils se rencontrent dans les secousses intermittentes et dans le tétanos dont ils contribuent à modifier la forme. A ce point de vue et en éliminant toutes les causes accessoires, la forme du tétanos dépend de deux conditions essentielles qui se contrarient réciproquement : d'une part, l'excitabilité du nerf dans laquelle je comprends les phénomènes d'addition latente, et de l'autre, les phénomènes d'arrêt, et le tétanos est le résultat de cette lutte entre ces deux influences. Quand l'excitabilité s'accroît ou que les actions d'arrêt diminuent, le tétanos a la forme ascendante comme dans la figure 14; quand l'excitabilité décroît ou que les actions d'arrêt augmentent, il a la forme descendante; quand les deux influences se font équilibre, on a le tétanos parfait à plateau horizontal, comme dans la figure 26. Ceci explique comment il se fait que le tétanos du muscle curarisé soit plus régulier et présente beaucoup moins de variations que le tétanos névro-direct ; c'est qu'en effet, suivant toute probabilité, les actions d'arrêt font défaut dans la substance contractile, ou du moins elles y sont infiniment moins marquées que dans les nerfs[1].

Ces actions d'arrêt permettent d'interpréter en partie les contractions initiales et terminales. Quand un nerf moteur est soumis à une série d'excitations intermittentes, si l'on suppose ces excitations rigoureusement égales comme intensité et l'excitabilité du nerf invariable pendant toute la durée de l'excitation, on aurait, s'il n'y avait pas d'actions d'arrêt, une série de secousses parfaitement égales comme amplitude. Mais les actions d'arrêt viennent modifier le phénomène. La première excitation détermine, les actions d'arrêt plus lentes à se produire n'ayant pas encore eu le temps d'agir, une secousse maximum; alors arrive la

1. Quelques-unes de mes expériences me porteraient à penser que la substance contractile peut présenter aussi des phénomènes d'arrêt. Mais l'interprétation de ces faits est trop incertaine encore pour que je puisse m'arrêter sur ce point.

deuxième excitation ; mais à ce moment l'arrêt commence à se produire et l'amplitude des secousses ultérieures diminue, soit brusquement comme dans la figure 21, soit graduellement comme dans la figure 15, suivant que l'équilibre entre les actions motrices et les actions d'arrêt s'établit plus ou moins rapidement [1]. Mais si cette interprétation peut s'appliquer aux cas dans lesquels la contraction initiale est plus forte, elle ne peut s'appliquer à ceux dans lesquels cette contraction est plus faible ; dans ce dernier cas, il y a me semble-t-il, un phénomène d'addition latente, c'est-à-dire une augmentation d'excitabilité du nerf à la suite de la première excitation.

La contraction terminale me paraît due aussi, au moins dans beaucoup de cas, à un phénomène d'arrêt. A ce point de vue, le tracé suivant est très instructif (*fig.* 24). On y voit une série de

Fig. 24. — Secousse terminale additionnelle.

secousses parfaitement régulières et correspondant exactement en nombre au nombre des excitations (extra-courant). Mais dès que la série des excitations a cessé, on voit se produire une secousse terminale *additionnelle* plus forte que les autres et qui ne correspond à aucune excitation. Quelle interprétation donner de ce fait ? Il me paraît difficile de n'y pas voir un phénomène d'arrêt analogue à ceux qu'on rencontrera plus loin à propos de la contraction réflexe et dans lesquels on voit une contraction se produire après la cessation de l'excitation. Il semble que, sous l'influence des actions d'arrêt, une partie seulement de l'excitation appliquée sur le nerf soit dégagée et employée à produire la secousse musculaire, tandis que l'autre partie reste dans le nerf à l'état d'*énergie latente* ou de *réserve d'excitation ;* à chaque

1. Comme je l'ai déjà indiqué plus haut, la contraction initiale ne se montre pas dans le tétanos du muscle curarisé.

nouvelle excitation, une nouvelle quantité d'énergie latente vient s'ajouter aux précédentes et augmenter la réserve d'excitation ; cette énergie latente ainsi accumulée représente une certaine somme de forces de tension équilibrées et annulées par les actions d'arrêt qui se produisent à chaque excitation ; alors au moment où ces actions d'arrêt cessent de se produire par la cessation même des excitations, ces forces de tension se dégagent et la secousse terminale se produit. Je ne veux pas m'étendre sur ce sujet sur lequel j'aurai à revenir plus loin et qui touche à la physiologie générale des nerfs. Je n'ai voulu qu'essayer ici une interprétation de la contraction terminale.

Quand cette secousse terminale est plus faible, cette interprétation n'est plus valable. Y a-t-il dans ce cas une diminution d'excitabilité ou un phénomène de fatigue ? Il me paraît difficile d'arriver à une explication satisfaisante.

Avant de terminer ce qui concerne l'excitation électrique du nerf moteur, je dirai un mot de l'influence exercée par les centres nerveux sur l'excitabilité du nerf et par suite sur la forme de la contraction névro-directe. Autrement dit, la forme de la contraction musculaire est-elle la même quand on excite un nerf moteur en connexion avec les centres nerveux ou quand on excite ce nerf après l'avoir isolé de ces centres par la section ? Il est bien entendu que, dans ce dernier cas, il ne faut pas attendre la dégénérescence du nerf. Pour ma part, sur la grenouille, je n'ai pas trouvé de différence sensible, ni dans la forme de la secousse, ni dans la forme du tétanos névro-direct, à part les différences d'amplitude dues à l'augmentation temporaire d'excitabilité consécutive à la section.

La *secousse névro-directe* produite par la *section* du nerf moteur est brève et identique à la secousse produite par une excitation électrique simple. Je n'ai pas constaté chez la grenouille l'allongement consécutif observé par Tiegel chez le lapin, allongement qui, d'après lui, différencierait la secousse produite par la section de la secousse produite par l'excitation électrique. J'ai vu du moins que cet allongement pouvait se montrer pour les deux modes d'excitation.

La *ligature* du nerf, quand elle est faite rapidement, donne la même secousse que la section. Quand elle est faite plus lentement, elle détermine une série de secousses qui empiètent les unes sur les autres, mais ne se fusionnent jamais jusqu'au tétanos.

L'*élongation* du nerf faite avec précaution et avec lenteur ne produit aucune secousse; mais quand elle acquiert un certain degré ou quand elle est faite brusquement, il survient des secousses d'abord simples, puis multiples, qui deviennent de plus en plus nombreuses et irrégulières à mesure que la traction exercée sur le nerf est plus forte. Enfin, quand la traction est poussée jusqu'à l'*arrachement* du nerf, les secousses se multiplient en restant presque toujours dissociées et donnent une ligne de contractions très irrégulière.

Les *excitations mécaniques intermittentes* du nerf moteur déterminent un tétanos dont la forme est identique à celle du tétanos obtenu par les courants induits. Je ne m'arrêterai pas sur ces faits bien connus depuis les expériences d'Heidenhain et de Langendorff.

L'excitation *chimique* du nerf moteur ne m'a donné aucun résultat en employant comparativement les mêmes excitants que j'avais essayés sur le muscle. Avec les acides acétique, nitrique, sulfurique, lactique, étendus ou concentrés, je n'ai pu avoir aucune contraction. Le nerf se détruisait, se recroquevillait sous l'influence de l'acide, mais sans qu'aucune contraction se produisît. L'acide était appliqué, tantôt sur le nerf dont la continuité était respectée, tantôt sur le nerf sectionné de façon que le bout sectionné trempât dans le liquide. Le temps me faisant défaut, je n'ai pas continué les expériences avec les excitants chimiques et me suis borné aux substances mentionnées plus haut.

3° *Contraction radico-directe.*

La contraction produite par l'excitation des racines motrices présente, dans ses caractères généraux, la même forme que la contraction névro-directe, quelle que soit du reste la nature de l'excitation. Je n'ai pu constater, en effet, les caractères que E. Cyon attribue à la secousse produite par l'excitation de la racine motrice quand cette racine est en connexion avec la moelle (Société de biologie, séance du 22 avril 1876). D'après cet auteur, la courbe ressemblerait dans ce cas à celle de la secousse réflexe. Pour ma part, il m'a semblé que la seule différence était peut-être une différence dans l'intensité du phénomène, autrement dit, qu'une contraction névro-directe exige une excitation plus intense qu'une contraction radico-directe de même amplitude.

C'est en somme ce qu'on observe, au moins le plus ordinairement, quand on excite le nerf moteur dans un point rapproché et dans un point éloigné du muscle.

Le *tétanos radico-direct* est de même identique au tétanos névro-direct. J'en donnerai comme exemple le tracé de la figure 25

Fig. 25. — Tétanos radico-direct.

qui représente le tétanos radico-direct obtenu par l'excitation d'une racine antérieure par les courants induits de l'appareil de Du Bois-Reymond.

En résumé, des expériences précédentes, il ressort cette conclusion que la contraction directe, sauf quelques différences tenant au lieu et à la nature de l'excitation, présente d'une façon générale toujours la même forme dont les types, secousse ou tétanos, sont aujourd'hui classiques.

B. — Contraction réflexe.

1°. *Contraction radico-réflexe.*

Les caractères de la *secousse radico-réflexe* ont été bien étudiés par Wundt (*Untersuchungen zur Mechanik der Nerven und Nervencentren*, p. 45), et je ne puis que confirmer ces résultats. En somme, la forme de la secousse est identique dans la contraction radico-réflexe et dans la contraction névro-réflexe ; la seule chose à noter, c'est une excitabilité plus grande des racines sensitives, quand on les compare aux nerfs sensitifs.

Le *tétanos radico-réflexe* ne peut être obtenu que très difficilement par les excitations intermittentes qui, portées sur le nerf moteur, déterminent le tétanos névro-direct. Ainsi, dans la figure 26,

on voit, sous l'influence d'excitations tétanisantes (courants induits de l'appareil de Du Bois-Reymond), l'excitation de la racine

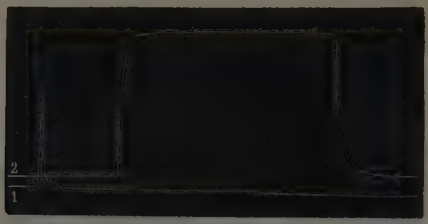


Fig. 26. — Secousse radico-réflexe, 1, et tétanos radico-direct, 2, produits par la même excitation.

sensitive ne produire qu'une simple secousse, 1, tandis que la même excitation appliquée sur la racine motrice produit le tétanos, 2. En augmentant l'intensité du courant, l'excitation gagne la moelle et la racine antérieure du côté opposé et, au lieu d'une secousse réflexe, on a le tétanos direct du gastro-cnémien du côté opposé.

2° *Contraction ganylio-réflexe.*

Il est presque impossible, chez la grenouille, de localiser exactement l'excitation dans le ganglion de la racine postérieure; l'excitation se transmet trop facilement aux parties voisines pour qu'on puisse attacher une certaine valeur aux résultats obtenus. Aussi ai-je laissé de côté ce mode d'excitation après quelques essais infructueux.

3° *Contraction névro-réflexe.*

La contraction névro-réflexe doit être étudiée sous ses deux formes, sous celle de *secousse* et sous celle de *tétanos,* en essayant les divers modes d'excitation. J'ai employé spécialement les excitations électriques et mécaniques.

Quand on fait agir sur le nerf sensitif une seule *excitation électrique* (courant constant ou courant induit), cette excitation doit être très intense pour produire une secousse névro-réflexe. Supposons, par exemple, qu'on emploie une excitation suffisamment intense pour déterminer, appliquée sur le nerf moteur, une secousse directe, pour avoir une secousse réflexe, en l'appliquant sur le

nerf sensitif, il faudra augmenter l'intensité de l'excitation dans le rapport de 1 à 3 ou 4 et quelquefois plus. En injectant des doses faibles de strychnine, la contraction directe et la contraction réflexe se produisent pour une intensité plus faible de l'excitant; mais, pour un léger degré d'intoxication, le rapport d'intensité 1 à 3 ou 4 reste le même; puis à mesure que l'intoxication strychnique augmente, ce rapport diminue et devient égal à zéro.

Les caractères de la *secousse névro-réflexe,* si on la compare à la secousse directe, présentent les différences suivantes qui ont déjà été signalées par Wundt (*Untersuchungen,* etc.).

L'amplitude de la secousse est, en général, moins considérable, sa durée est plus longue et cet allongement porte surtout sur la période de descente: enfin, le muscle revient moins complètement à sa longueur primitive et présente assez souvent un certain degré de contracture consécutive. Je ne ferai que mentionner l'augmentation de la période d'excitation latente, cette question ne rentrant pas dans mon sujet. Je ne m'appesantirai pas sur ces caractères de la secousse névro-réflexe dont l'étude complète et détaillée a été faite par Wundt dans le travail déjà cité. Ces caractères, du reste, ne varient pas, que l'excitation soit produite par les courants constants, les courants induits, les décharges du condensateur ou l'extra-courant.

Quand, au lieu d'une seule excitation électrique, on fait agir sur le nerf sensitif plusieurs excitations successives avec une fréquence variable, on obtient, au lieu d'une simple secousse, une *série de secousses* qui *peuvent* se fusionner plus ou moins complètement en un *tétanos névro-réflexe.*

Ce *tétanos névro-réflexe* présente les caractères suivants:

1° Il peut se produire pour des excitations qui, isolées, ne détermineraient aucune secousse névro-réflexe. On a donc là des phénomènes d'*addition latente* comparables à ceux qu'on observe dans le nerf moteur;

2° La forme du tétanos névro-réflexe est différente de celle du tétanos direct, telle qu'elle a été étudiée dans les paragraphes précédents. Dans le tétanos névro-réflexe, le plateau tétanique n'existe pas ou est très arrondi et la courbe se rapproche plus ou moins de la secousse musculaire simple. Les figures 1 à 3, pl. XVIII, donnent des exemples des principaux types observés. Quelquefois cette contraction est double, soit que les deux contractions se succèdent immédiatement, soient qu'elles soient sé-

parées par un intervalle plus ou moins prolongé. En outre, la forme du tétanos névro-réflexe est plus irrégulière comme le montre l'inspection seule des figures. Assez souvent, le tétanos névro-réflexe est suivi d'un raccourcissement permanent qui se prolonge plus ou moins longtemps (*fig.* 1, *c;* pl. XVIII). En résumé, ce qui domine, c'est une variabilité extrême très frappante, surtout si on la met en regard de la régularité typique du tétanos direct, variabilité qui porte à la fois sur la forme, la durée et le mode d'apparition du tétanos névro-réflexe.

Quoique la question ne touche pas au sujet dont je m'occupe spécialement dans ce travail, je dirai quelques mots de la *période d'excitation latente* du tétanos névro-réflexe, autrement dit du moment d'apparition de ce tétanos en le comparant à ce point de vue au tétanos névro-direct.

Le tétanos névro-réflexe apparaît longtemps après le tétanos névro-direct; il y a donc un retard du premier sur le second, retard qui peut varier de quelques fractions de seconde à 4 et 5 secondes et plus.

Un fait qui semble d'abord paradoxal, c'est qu'en examinant les chiffres obtenus, on voit que le retard du tétanos névro-réflexe *augmente* avec la durée de l'excitation tétanisante. En examinant de plus près le phénomène, et en regardant les tracés, on constate le fait suivant sur la grenouille : *le tétanos névro-réflexe se produit toujours après la cessation de l'excitation,* à moins que celle-ci ne soit prolongée au delà de certaines limites; si alors on calcule le retard de ce tétanos, *en partant du moment de la cessation de l'excitation,* on voit que ce retard diminue avec la durée de l'excitation. C'est ce que fait ressortir le tableau suivant, qui donne les chiffres d'une des expériences (les chiffres expriment des douzièmes de seconde).

DURÉE DE L'EXCITATION tétanisante.	RETARD DU TÉTANOS RÉFLEXE sur le début de l'excitation.	RETARD DU TÉTANOS RÉFLEXE sur la fin de l'excitation.
26	108	82
29	178	149
70	210	50
190	228	38
330	333	3

On voit par ce tableau que, sauf pour la première contraction, le retard diminue avec la durée de l'excitation et l'on serait porté à penser que le moment du dégagement nerveux qui détermine la contraction réflexe coïncide avec la cessation de l'excitation tétanisante. J'aurai à revenir plus tard sur ce fait.

3° La durée du tétanos névro-réflexe est, en général, plus courte que celle du tétanos névro-direct et surtout, ce qui est important, c'est que cette durée est beaucoup moins influencée par la durée de l'excitation. Ainsi dans une série d'expériences dans lesquelles la durée du tétanos direct variait de 29 à 321 douzièmes de seconde (celle de l'excitation tétanisante variant de 26 à 320 douzièmes), la durée du tétanos névro-réflexe n'a varié que de 20 à 45 douzièmes de seconde. Il n'y a donc pas, entre la durée de l'excitation tétanisante et celle du tétanos névro-réflexe, l'étroite relation qui existe entre cette durée et celle du tétanos direct; ce fait a une importance capitale au point de vue de l'interprétation théorique de la contraction réflexe.

Les faits que je viens de décrire ont échappé à l'attention des expérimentateurs, ou du moins leur attention ne s'est pas arrêtée sur ce sujet. Dans Wundt, par exemple, qui a si bien étudié les caractères comparés de la secousse directe et de la secousse réflexe, on ne trouve presque rien sur le sujet qui nous occupe. Dans son troisième chapitre intitulé : *Von der Interferenz verschiedener Reflexreize und dem Einfluss der höheren Nervencentren auf den Reflexvorgang*, il traite bien des chocs d'induction tétanisants, mais la question est prise à un tout autre point de vue.

On s'explique facilement du reste que ces faits aient échappé, comme je l'ai dit plus haut, à la plupart des expérimentateurs et qu'ils n'aient pas été l'objet d'une étude détaillée. Comme il est souvent difficile d'obtenir sur des grenouilles normales, excérébrées ou non, des contractions réflexes par l'excitation des nerfs sensitifs, on a presque toujours employé, pour augmenter l'intensité des phénomènes réflexes, des grenouilles empoisonnées par la strychnine. Or, la strychnine, même à faibles doses, modifie notablement la forme du tétanos réflexe.

Il n'y a, pour s'en assurer, qu'à suivre sur une grenouille, la marche graduelle de l'intoxication strychnique telle qu'on peut la voir sur les tracés reproduits dans les figures 1 à 2, pl. XIX. Ces tracés sont pris sur une grenouille dont le cerveau a été détruit ; les muscles fléchisseurs de la patte sont attachés, à droite et à

gauche, aux deux leviers d'un myographe double de Marey, le nerf sciatique droit est mis à nu de façon à avoir par son excitation la contraction névro-directe des muscles du côté droit et la contraction névro-réflexe de ceux du côté gauche. L'excitation tétanisante se fait par les courants induits de l'appareil de Du Bois-Reymond. Pour une excitation d'intensité égale à 15, la contraction directe se montre seule; il n'y a pas de contraction réflexe. A 20 d'intensité, on n'a qu'une contraction réflexe très légère ayant la forme d'une secousse allongée (*fig.* 1, pl. XIX), quelquefois même la forme de la contraction d'un muscle lisse. Je lui injecte à ce moment un dixième de milligramme de strychnine. L'effet se produit très vite et la contraction réflexe, toujours très légère, se produit beaucoup plus vite (*fig.* 2, pl. XIX); elle conserve ce-

Fig. 27. — Tétanos névro-réflexe[1]

pendant à peu près la même forme qu'elle avait avant l'intoxication. Mais bientôt cette forme même change et se rapproche, sauf l'amplitude, de la forme du tétanos direct, comme on le voit dans les figures 27, 28 et 29. On voit aussi que le retard du tétanos réflexe diminue peu à peu et que bientôt le début de ce tétanos coïncide avec le début du tétanos direct[2]. Enfin, la durée du tétanos névro-réflexe strychnique est plus longue que celle du té-

1. 1, ligne sur laquelle sont indiqués le début et la fin de l'excitation; 2, ligne de la contraction réflexe; 3, ligne de la contraction directe. (Même signification des chiffres pour les figures 27 à 29.)

2. Le retard apparent qui existe sur les tracés entre le début des deux tétanos tient simplement à ce que le levier qui inscrivait le tétanos réflexe était un peu plus long que l'autre pour éviter la confusion dans les tracés.

tanos névro-réflexe ordinaire normal et quelquefois même que celle du tétanos névro-direct, sauf quand l'intoxication acquiert une certaine intensité. Dans ce cas, en effet, les deux tétanos, direct et

Fig. 28. — Tétanos névro-réflexe.

réflexe, ont la même durée. L'amplitude du tétanos névro-réflexe strychnique est d'ailleurs moins considérable que celle du tétanos direct.

Il semble donc que la strychnine transforme la moelle en quelque chose d'analogue à un nerf moteur. C'est comme si le nerf

Fig. 29. — Tétanos névro-réflexe.

moteur se continuait directement depuis le muscle jusqu'au point du nerf mixte excité et comme si la moelle n'existait pas en tant que centre nerveux. La strychnine a accéléré la transmission dans la moelle, car il est inadmissible qu'elle ait accéléré la transmission dans les nerfs sensitifs et moteurs. On est donc porté

à admettre qu'à l'état normal, il existe dans les centres nerveux des obstacles à la transmission de l'excitation à travers ces centres et que la strychnine lève ces obstacles. Quels sont ces obstacles? Sont-ce des appareils d'arrêt qui seraient paralysés par la strychnine et l'action de cette substance devrait-elle être interprétée autrement qu'on ne le fait généralement? Je ne fais qu'indiquer cette question sur laquelle j'aurai occasion de revenir.

Les *excitations mécaniques* portées sur les nerfs sensitifs déterminent difficilement des contractions névro-réflexes, et cela même chez les grenouilles intoxiquées par la strychnine. Ainsi, chez une grenouille strychnisée chez laquelle le moindre attouchement de la peau provoquait immédiatement des contractions tétaniques, le tiraillement du nerf porté jusqu'à une élongation considérable ne provoquait aucune contraction réflexe.

Les *excitations mécaniques intermittentes* du nerf sensitif ne m'ont pas donné de résultat.

Pour les *excitations chimiques,* je ne puis que m'en référer à ce que j'ai dit déjà des excitations chimiques portées sur le nerf moteur. Je n'ai pu que constater le même résultat négatif.

4° *Contraction périphéro-réflexe.*

a) *Excitations cutanées.*

Quand on emploie, pour l'excitation de la peau, des électrodes sèches, métalliques, c'est avec la plus grande difficulté qu'on obtient une contraction réflexe par les excitations électriques, soit isolées, soit intermittentes, même quand on augmente la fréquence et, dans de certaines limites, l'intensité des excitations. Celles-ci peuvent être continuées jusqu'à 30 secondes et plus sans produire de résultat. Il en était ainsi, quel que fût le point de la peau excité (membres supérieurs, pattes, peau du pourtour de l'anus, etc.), que les électrodes fussent appliquées du même côté que le muscle attaché au levier du myographe (fléchisseur, gastro-cnémien) ou qu'elles le fussent du côté opposé. Et cependant ces mêmes excitations, qui étaient inefficaces quand on les portait sur la peau, déterminaient une contraction névro-réflexe quand on les appliquait sur le nerf sensitif. Il est bien entendu qu'il ne s'agit ici que de grenouilles non strychnisées. L'ablation du cerveau ou la section de la partie supérieure de la moelle ne paraissait pas modifier les résultats.

Cependant cette inefficacité n'est pas absolue. Dans un cas, par exemple, l'excitation de la peau de la partie inférieure de l'abdomen avec des courants induits d'intensité égale à 15 et d'une fréquence de 9 par seconde détermina, après 19 secondes (soit 171 excitations), des contractions des fléchisseurs et du gastro-cnémien se reproduisant rythmiquement à trois reprises différentes sous forme de secousses non fusionnées ou incomplètement fusionnées et augmentant de durée de la première à la troisième (*fig.* 30). Une autre fois, avec l'extra-courant fourni par quatre

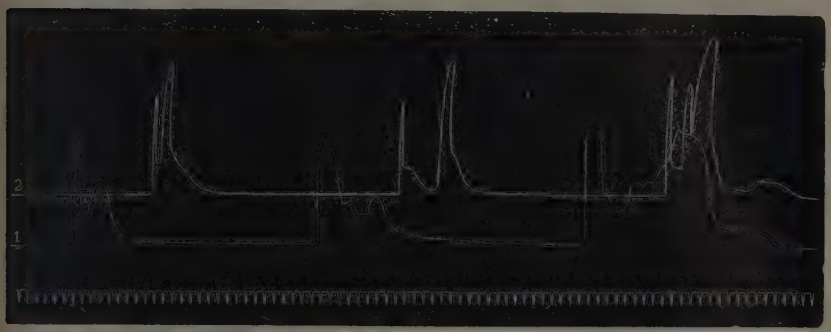


Fig. 30. — Contractions périphéro-réflexes des fléchisseurs, 1, et du gastro-cnémien, 2.

éléments et avec une fréquence de 6 excitations par seconde, l'excitation de la peau de la main donna, au bout de 13 secondes (soit après 78 excitations), une contraction réflexe des gastro-cnémiens sous forme de secousse très allongée d'une très faible amplitude. Il faut noter que dans ces cas le cerveau était conservé.

Quand on augmente notablement l'intensité du courant, les contractions réflexes se produisent plus facilement, mais alors on a affaire à des excitations douloureuses, et d'ailleurs en augmentant d'une façon trop considérable l'intensité du courant, l'excitation électrique peut atteindre par diffusion les nerfs eux-mêmes et alors ce ne sont plus les effets de l'excitation électrique de la peau qu'on obtient.

L'inefficacité relative des excitations électriques portées directement sur la peau de la façon indiquée ci-dessus tient en grande partie à la difficulté du passage du courant. Aussi en employant, au lieu d'électrodes sèches, des électrodes humides, on obtient

bien plus facilement la contraction réflexe. Mais il me semble qu'il y a encore une autre cause et que, dans bien des cas, cette résistance au passage ne peut être invoquée. Je serais porté à croire que dans ces expériences il y a simultanément excitation de fibres nerveuses ou d'appareils d'arrêt et de fibres nerveuses excito-motrices dont l'activité est contre-balancée par les premières. J'en citerai des exemples à propos des phénomènes d'arrêt dans la dernière partie de ce travail.

Les *excitations mécaniques* appliquées sur la peau produisent plus facilement, d'une façon générale, les contractions réflexes que les excitations électriques. Mais à ce point de vue il faut faire la part du mode d'excitation qui a une très grande influence. Il faut distinguer d'abord les *excitations tactiles simples* des *excitations douloureuses.*

Le *contact simple* avec un stylet mousse détermine quelquefois des contractions réflexes sous forme de petites secousses simples ou multiples; mais il arrive très souvent qu'un simple contact ne produise rien. Il y a sous ce rapport des différences individuelles assez notables; la destruction du cerveau, la section de la moelle modifient aussi les résultats sans leur donner plus de constance. Ces contacts simples sont plus efficaces quand l'animal, *privé ou non du cerveau,* a été déjà soumis à des excitations antérieures.

Les *contacts répétés* produisent beaucoup plus sûrement les contractions réflexes; mais là encore il faut distinguer la façon dont se fait la répétition des excitations. Les frottements ou les contacts répétés *irrégulièrement* ont le plus d'efficacité et déterminent facilement des secousses réflexes simples ou multiples qui ne prennent jamais la forme tétanique, comme on peut le voir sur les figures suivantes qui représentent les secousses obtenues par l'excitation mécanique avec une pointe mousse de la patte (*fig.* 31) et de la peau de l'anus (*fig.* 32). Quelquefois la contrac-

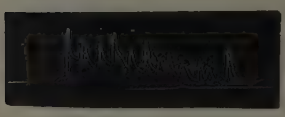


Fig. 31. — Contractions réflexes par l'excitation mécanique de la peau de la patte.

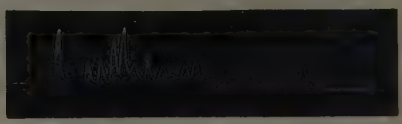


Fig. 32. — Contractions réflexes par l'excitation mécanique de la peau de l'anus.

tion n'a lieu qu'après un temps très long; il faut parfois exciter pendant 40 secondes et plus pour déterminer des contractions.

Dans certains cas, la contraction réflexe a la forme d'une secousse simple.

Quand les contacts sont répétés à des intervalles *réguliers*, même assez espacés, on obtient encore des contractions réflexes; ainsi en mettant 2 à 5 secondes d'intervalle entre chaque excitation, on a des contractions au bout de 6 à 12 excitations suivant le point excité; quelquefois même il faut beaucoup plus longtemps, jusqu'à 33 excitations, et il arrive parfois qu'on n'obtient rien. La contraction a souvent alors la forme d'une secousse allongée ressemblant à la contraction des muscles lisses (*fig.* 33).

Fig. 33. — Secousse réflexe par excitation mécanique de la peau; gastro-cnémien.

J'ai essayé l'action des excitations mécaniques *parfaitement intermittentes* en disposant une sorte de petit appareil tétano-moteur agissant par percussion et pouvant donner des excitations de fréquence variable. Ce mode d'excitation a été inefficace, tandis que chez les mêmes animaux le simple frottement de la peau avec un stylet mousse déterminait des contractions réflexes.

Les *excitations douloureuses* produisent facilement, comme on sait, des contractions réflexes. C'est ainsi qu'agissent le pince-

Fig. 34. — Contraction réflexe du gastro-cnémien produite par le pincement de la peau de l'anus.

ment de la peau, les piqûres et surtout la pression entre les mors d'une pince. On a, suivant les cas, tantôt des secousses plus ou

moins allongées, tantôt des secousses violentes qui dans tous les cas se fusionnent difficilement et dont les figures 34 et 35 peuvent donner une idée.

Fig. 35. — Contraction réflexe du gastro-cnémien produite par le pincement de la peau de l'anus.

En résumé, d'une façon générale, la contraction cutanéo-réflexe a la forme d'une secousse simple ou multiple, rarement fusionnée et presque toujours irrégulière.

Avant d'aller plus loin, je m'arrêterai sur quelques points qui me paraissent nécessiter des développements.

Le premier de ces points est le suivant. Quand on a attaché aux leviers du myographe double le tendon du gastro-cnémien et le tendon des fléchisseurs de la patte, on observe que les contractions réflexes du gastro-cnémien sont ordinairement accompagnées des contractions des fléchisseurs. Celles-ci se montrent quelquefois avant les autres et il peut arriver aussi que la contraction ne se produise que dans les fléchisseurs et pas dans le gastro-cnémien. Ce dernier muscle est donc mal choisi quand on veut étudier les mouvements réflexes et il vaut mieux s'adresser à d'autres muscles.

En outre la contraction des fléchisseurs a souvent une forme différente de celle du gastro-cnémien, et cependant si on excite à la fois les filets musculaires des deux muscles en sectionnant ou en excitant le nerf sciatique, on a une forme de contraction identique dans les deux muscles. La différence dans la forme de la contraction cutanéo-réflexe dans les fléchisseurs et dans le gastro-cnémien serait donc *de nature centrale.*

Ce n'est pas seulement dans les fléchisseurs de la patte qu'il se produit des contractions précédant celles du gastro-cnémien. Ces contractions se produisent encore dans d'autres muscles et déterminent des *mouvements avant-coureurs* déjà signalés du reste. Ces mouvements, qui apparaissent avant les contractions des fléchisseurs, consistent en mouvements d'ensemble du tronc et des

épaules, mouvements très légers ordinairement et quelquefois à peine perceptibles; ils sont tout à fait comparables aux mouvements que fait un homme endormi quand on le tracasse un peu pendant son sommeil sans le réveiller. Ces contractions, qui portent sur les muscles du tronc, des épaules et des membres antérieurs, peuvent devenir assez violentes, sans pour cela être suivies de contractions dans les muscles des membres inférieurs.

Le second point concerne le *lieu d'application* des excitations mécaniques. D'une façon générale, c'est la peau du pourtour de l'anus qui se montre la plus sensible à l'excitation mécanique; les réflexes ainsi déterminés sont plus intenses et se montrent plus rapidement; puis viennent la membrane interdigitale et les orteils, la main, et enfin la peau du dos et des autres régions. Mais l'influence la plus grande est exercée par le côté même du corps qui est excité, fait du reste bien connu. Aussi je ne m'y arrêterai pas et me contenterai de renvoyer aux figures 2 et 3 de la planche XVII. Il y a cependant des exceptions à cette règle. Dans certains cas, les contractions ont lieu dans les muscles du côté opposé avant de se montrer dans les muscles du même côté. J'en donnerai comme exemple une expérience pour mieux fixer les idées. Les deux tendons des fléchisseurs et du gastro-cnémien de la patte *gauche* sont fixés aux deux leviers du myographe double; en grattant doucement les doigts de la main *gauche*, j'ai d'abord des contractions dans les fléchisseurs de la patte *droite* libre, et seulement un certain temps après, des contractions dans les fléchisseurs de la patte *gauche*. En excitant mécaniquement la peau de l'anus, même résultat; toujours la patte libre se contracte avant la patte dont les muscles sont fixés au levier du myographe. A quoi tient cette différence? Elle ne peut tenir à une diminution d'excitabilité des muscles ou des nerfs moteurs *gauches*, car leur excitation directe détermine une secousse tout à fait normale. Elle ne peut tenir non plus à la résistance opposée à la contraction par le ressort du myographe. Il y a donc très probablement diminution d'excitabilité de la moitié *gauche* de la moelle, diminution due vraisemblablement à la préparation des muscle du côté *gauche* (section de la peau, tiraillement des nerfs musculo-tendineux, etc.).

Le troisième point concerne les faits mentionnés pages 112 et 113. J'ai dit que les contacts simples étaient plus efficaces quand l'animal, privé ou non de cerveau, avait déjà été soumis à

des excitations antérieures. On a vu aussi que des contacts répétés à des intervalles même assez espacés, 2 à 5 secondes par exemple et même plus encore, déterminaient des contractions réflexes au bout d'un certain nombre d'excitations. Il y a là des phénomènes qui rappellent les phénomènes d'addition latente, mais d'addition latente *à longue portée*. Ces faits montrent que la modification produite par une excitation sur le système nerveux persiste plus longtemps qu'on ne le croirait au premier abord, constituant ainsi une sorte de *réserve d'excitation* qu'augmentent peu à peu les excitations successives suivies toutes de leur modification persistante ; quand cette réserve d'excitation a acquis une certaine intensité, la moindre excitation suffit pour la faire passer de l'état latent, de l'état de tension à l'état actif et la contraction se produit (voir aussi p. 98).

Ces phénomènes peuvent se présenter sous une forme intéressante au point de vue des fonctions des centres nerveux et je citerai comme exemple une de mes expériences.

Le 5 décembre 1876, j'enlève les hémisphères cérébraux sur une grenouille assez grosse, bien vivace. Elle perd peu de sang ; la plaie est réunie par un point de suture et l'animal abandonné à lui-même. Le lendemain, je constate sur elle les faits suivants qui furent observés un grand nombre de fois. Elle a l'attitude accroupie normale et à première vue ne se distingue en rien d'une grenouille intacte. Je touche la cornée légèrement avec un stylet mousse, elle ferme les yeux mais sans bouger ; je réitère le contact, elle ferme les yeux et baisse la tête ; je réitère encore, elle ferme les yeux, baisse la tête et fait un mouvement de la main du côté correspondant à l'œil excité ; je renouvelle mon contact, mêmes mouvements auxquels vient s'ajouter un mouvement d'ensemble du tronc, comme une sorte de torsion ; je touche de nouveau, mêmes phénomènes, mais de plus il y a un mouvement de progression en avant, mais sans sauter. Les contacts étaient très légers, autant que possible identiques et séparés par des intervalles assez longs pour permettre à l'animal de revenir au repos complet. Je recommence l'expérience en touchant cette fois la peau du dos au niveau des premières vertèbres dorsales, un peu sur le côté. Là, l'expérience est encore plus frappante. Premier contact : elle baisse un peu la tête ; deuxième : le mouvement d'abaissement est plus fort ; tout le reste du corps est immobile ; troisième contact : léger mouvement de recul ; quatrième contact : mouvement

de recul plus prononcé ; cinquième contact : mouvements des mains et de la patte postérieure correspondante qui se rapproche du point touché, mais sans y arriver ; sixième contact : mouvements des deux pattes de derrière ; septième contact : saut incomplet ; huitième contact : saut définitif bien franc. En touchant la peau au-dessus de l'anus, même série de mouvements. L'animal fut sacrifié le 8 mars 1877. L'autopsie montra que les deux hémisphères cérébraux avaient été enlevés en totalité ; les autres parties du cerveau avaient été respectées. Je me contente de mentionner cette expérience sans entrer dans des développements qui ne rentrent pas dans le sujet que j'ai plus spécialement en vue dans ce travail.

J'ai essayé à plusieurs reprises l'influence *d'excitations successives intermittentes de nature différente*. Je voulais voir si des excitations, inefficaces par elles-mêmes, pouvaient devenir efficaces quand on faisait varier rapidement la nature de l'excitation. Pour cela j'ai disposé un appareil interrupteur de telle façon qu'une excitation électrique (choc d'induction) fût suivie d'une excitation mécanique (percussion de la peau) ; les excitations électriques et mécaniques alternaient régulièrement et le nombre *total* des excitations pouvait varier de 1 à 26 par seconde. Dans ces conditions, pas plus qu'avec les excitations mécaniques ou électriques intermittentes séparées, je n'ai obtenu de contractions réflexes, même en continuant les excitations plus de 30 secondes.

Les *excitations chimiques* de la peau ont été les plus étudiées. C'est en effet le procédé le plus employé ordinairement quand on veut rechercher chez la grenouille les conditions des mouve-

Fig. 36. — Contraction réflexe du gastro-cnémien sous l'influence de l'acide acétique à $^1/_{10}$ appliqué sur la peau de la patte [1].

1. La contraction du gastro-cnémien a été précédée de mouvements avant-coureurs dans les muscles des membres antérieurs.

ments réflexes. Aussi je ne m'y arrêterai pas. Je me contenterai de dire quelques mots de la forme de la contraction réflexe à la suite des excitations chimiques de la peau (acide étendu, essence de térébenthine). La contraction a tantôt la forme d'une secousse plus ou moins allongée, plus ou moins régulière (*fig.* 36) ; mais ces secousses ont plus de tendance à se fusionner que pour les autres modes d'excitation et peuvent même arriver à un tétanos presque complet, mais jamais aussi régulier et aussi pur que le

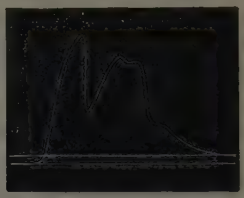


Fig. 37. — Même légende que pour la figure 36.

tétanos direct. J'en donnerai comme exemples les figures 37, 38, 39 et 40.

b) *Excitations viscérales.*

Il m'a paru intéressant de comparer les effets des excitations viscérales à ceux des excitations cutanées, autrement dit de voir si la forme de la contraction *viscéro-réflexe* était la même que celle de la contraction cutanéo-réflexe. Je n'ai pu, faute de temps, faire sur ce sujet qu'un petit nombre d'expériences dont je donnerai les résultats.

J'ai essayé l'action des *courants induits* sur le cœur, l'estomac, l'intestin et le poumon. Je fixais solidement la grenouille sur la planchette de la façon ordinaire; seulement au lieu de la face ventrale, c'était la face dorsale de l'animal qui reposait sur la planchette ; j'ouvrais alors l'abdomen et le thorax pour mettre les viscères à nu, afin de pouvoir appliquer directement sur eux les excitations. C'est toujours la paroi externe des viscères qui a été excitée. Je n'ai pas fait de recherches sur l'excitation de leur paroi interne.

Avec le poumon, je n'ai obtenu aucune contraction réflexe. Le cœur et l'estomac, au contraire, ont toujours réagi très facilement, plus facilement même que la peau. En excitant le cœur par des courants faibles, d'une intensité = 15, pour 5 excitations par

Fig. 38. — Contractions réflexes des fléchisseurs, 1, et du gastro-cnémien, 2, sous l'influence de l'acide acétique appliqué sur la peau de la patte.

Fig. 39. — Même légende que pour la figure 38.

Fig. 40. — Contractions réflexes des fléchisseurs sous l'influence de l'acide acétique appliqué sur la peau de la patte.

seconde, la contraction cardio-réflexe se produisait au bout de 15 secondes (ou 75 excitations); pour 10 excitations par seconde, elle se montrait après 5 secondes seulement, soit après 50 excitations. Les figures 41 et 42 représentent les contractions obtenues

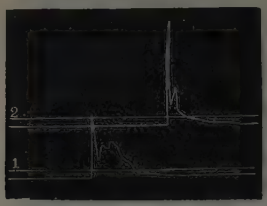


Fig. 41. — Contraction cardio-réflexe des fléchisseurs (ligne inférieure, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence des courants induits (pour 5 excitations par seconde).

dans les deux cas dans les fléchisseurs et dans le gastro-cnémien. Pour une intensité = 10 seulement, avec un peu moins de

Fig. 42. — Même légende que pour la figure 41 (pour 10 excitations par seconde).

10 excitations par seconde, la contraction se montrait, mais beaucoup plus faible, surtout pour le gastro-cnémien, après 31 secondes seulement, soit 294 excitations.

Avec l'estomac, les phénomènes sont à peu près les mêmes; aussi je n'y insisterai pas : je me contenterai de donner un tracé des contractions stomaco-réflexes (*fig.* 43). Dans un cas, la contraction s'est produite une seconde et demie seulement après la cessation de l'excitation qui avait duré 37 secondes.

Pour les *excitations mécaniques*, j'ai employé les frottements doux avec un stylet mousse, les percussions légères à intervalles réguliers et la compression entre les mors d'une pince.

Les *frottements* étaient continués jusqu'à ce que la contraction se produisît. Pour le cœur et l'estomac, il fallait de 25 à 40 se-

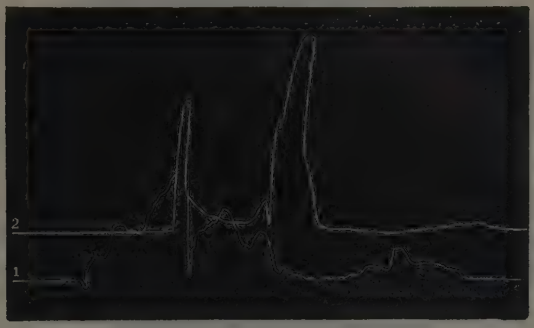


Fig. 43. — Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs (ligne inférieure, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence des courants induits.

condes et les figures 44 et 45 donnent les formes de la contraction

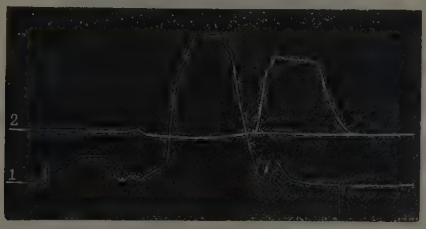


Fig. 44. — Contractions cardio-réflexes des fléchisseurs (ligne inférieure, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence de frottements répétés.

réflexe des fléchisseurs et du gastro-cnémien dans les deux cas.

Fig. 45. — Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs (ligne inférieure, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence de frottements répétés.

Pour le gros intestin, il fallait un temps plus long et les contractions étaient toujours moins fortes (*fig.* 46). Avec les poumons, le résultat était nul.

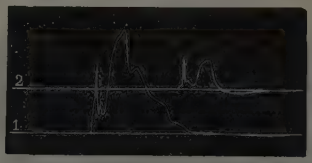


Fig. 46. — Contractions réflexes des fléchisseurs (ligne inférieure, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence de frottements répétés du gros intestin.

Les *percussions intermittentes* déterminaient plus rapidement des contractions viscéro-réflexes qui, du reste, présentaient le même caractère et les mêmes formes que les contractions déterminées par le frottement, comme on peut s'en assurer par les figures 47

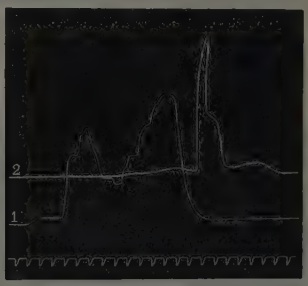


Fig. 47. — Contractions cardio-réflexes des fléchisseurs (ligne moyenne, 1) et du gastro-cnémien (ligne supérieure, 2) sous l'influence de percussions intermittentes (indiquées sur la ligne inférieure).

et 48. Il arrive souvent que lorsque les contractions ont été plus tardives, elles sont plus violentes.

Fig. 48. — Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs (ligne 1) et du gastro-cnémien (ligne 2) sous l'influence de percussions intermittentes (indiquées sur la ligne inférieure).

Les contractions produites par la *compression* (pression entre les mors d'une pince) présentent aussi les mêmes caractères (*fig.* 49).

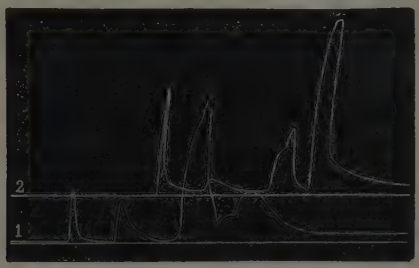


Fig. 49. — Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs (ligne 1) et du gastro-cnémien (ligne 2) par suite de compression.

Si on compare, au point de vue de la forme, les contractions viscéro-réflexes déterminées par les courants induits et celles produites par les actions mécaniques, on voit dans ces dernières une tendance marquée à prendre la forme tétanique, comme on peut s'en assurer en regardant les figures 44 et 45. Mais ce tétanos est toujours irrégulier, et même lorsque les excitations mécaniques sont intermittentes et se font à des intervalles parfaitement réguliers, comme on peut le voir sur les tracés, jamais cette régularité ne se retrouve dans les contractions.

En résumé, les recherches précédentes conduisent aux conclusions suivantes :

La contraction réflexe offre des caractères qui la différencient de la contraction directe, qu'elle se présente sous forme de secousse ou sous forme de tétanos ;

La secousse réflexe présente la même forme, sauf quelques variations légères, quel que soit le point excité, périphérie sensitive, nerf sensitif ou racine sensitive.

La secousse réflexe se distingue de la secousse directe par son amplitude moindre, sa durée plus longue, l'augmentation de la période d'excitation latente et par l'existence plus fréquente d'un certain degré de contracture consécutive.

Le tétanos réflexe, ou mieux la contraction réflexe qui succède aux excitations tétanisantes, présente une forme beaucoup plus variable que le tétanos direct et n'a jamais la régularité typique de ce dernier.

Le tétanos réflexe peut se présenter, tantôt sous la forme de

secousse simple, quelquefois allongée comme celle des muscles lisses, tantôt sous celle de secousses irrégulières plus ou moins fusionnées, tantôt sous celle de tétanos incomplet, plus rarement enfin sous la forme de véritable tétanos, mais qui, même dans ce cas, n'a jamais la régularité du tétanos direct.

Le tétanos réflexe apparaît plus tard que le tétanos direct et ne se montre très souvent qu'après la cessation de l'excitation tétanisante, à moins que cette excitation ne soit prolongée très longtemps.

La durée du tétanos réflexe est plus courte que celle du tétanos direct et cette durée est, dans certaines limites, indépendante de la durée de l'excitation tétanisante. Du reste, d'une façon générale, il n'y a pas entre l'excitation et le tétanos réflexe l'étroite relation qui existe entre l'excitation et le tétanos direct.

Telles sont les conclusions générales qui ressortent de mes expériences sur la contraction réflexe.

A quoi tiennent maintenant ces différences de forme de la contraction réflexe et de la contraction directe? Il est bien difficile de répondre à cette question. Je n'ai pu jusqu'ici trouver une loi qui permette d'expliquer les variations de forme de la contraction réflexe et je n'ai pu constater de relation évidente entre ces formes et les conditions de l'excitation. Un fait pourtant se dégage avec netteté, c'est que les conditions qui déterminent la forme de la contraction réflexe doivent être cherchées principalement dans les centres nerveux eux-mêmes. Je reviendrai plus loin sur cette question.

Avant de terminer ce qui concerne la contraction réflexe, je dois revenir sur un fait dont j'ai déjà dit quelques mots et qui a une certaine importance au point de vue de l'interprétation théorique de la contraction musculaire.

Dans la plupart de mes expériences sur la contraction réflexe, j'ai pu constater ce fait que presque toujours les fléchisseurs de la patte et le gastro-cnémien, c'est-à-dire les muscles antagonistes, se contractaient *simultanément,* sauf dans les cas mentionnés plus haut et avec les réserves ci-dessus indiquées. Les cas dans lesquels les muscles d'un seul côté de l'articulation se contractaient seuls étaient des cas exceptionnels. On arrive donc à cette conclusion que, dans un mouvement réflexe donné, on a à la fois contraction des muscles qui déterminent le mouvement et contraction des muscles antagonistes, et que le mouvement produit

résulte en réalité de la prédominance de la première contraction sur l'autre, et d'une sorte d'équilibre qui s'établit entre les deux contractions. Je ne fais que mentionner ce fait, sur lequel n'ont pas porté spécialement mes recherches et que je me réserve d'étudier plus tard en détail.

C. — Contraction centrale.

J'ai étudié, dans les deux chapitres précédents, les conditions qui déterminent la forme de la contraction directe et de la contraction réflexe; j'étudierai maintenant la contraction musculaire centrale, c'est-à-dire celle qui est déterminée par l'excitation directe des centres nerveux. Avant d'aller plus loin, je rappellerai que les recherches qui font le sujet de ce travail ne portent que sur la grenouille et que les conclusions à en tirer ne peuvent être appliquées qu'à cet animal. Cette réserve est d'autant plus nécessaire que j'ai tout lieu de croire que les centres nerveux des animaux supérieurs se comportent d'une façon différente, au moins sur un certain nombre de points.

Le temps ne m'a pas permis de multiplier, autant que je l'aurais voulu, les expériences sur la contraction centrale; aussi ai-je dû laisser de côté certaines questions sur lesquelles je n'avais que des matériaux tout à fait insuffisants. Les procédés d'excitation ont été aussi beaucoup moins variés que pour la contraction réflexe et la contraction directe. Malgré cela, les résultats que j'ai obtenus, en restant dans un cercle limité d'expériences, m'ont paru assez nets pour mériter l'attention.

Les seuls procédés d'excitation que j'aie employés pour les centres nerveux sont, pour l'excitation électrique, les courants intermittents de fréquence variable et surtout les courants induits de l'appareil à glissement de Du Bois-Reymond, pour l'excitation mécanique, les sections à différentes hauteurs. Les chocs simples d'induction ou de courant constant ne m'ont donné que des secousses simples qui ne m'ont pas paru se différencier sensiblement des secousses musculaires directes. La piqûre avec une aiguille, que j'ai essayée dans quelques cas, ne m'a donné que des résultats variables, tandis que ceux que j'obtenais par la section étaient beaucoup plus nets.

J'ai essayé d'abord l'*excitation comparée de la moelle et du nerf moteur avec les courants intermittents.* L'expérience est disposée

de la façon suivante : la moelle est sectionnée à sa partie supérieure; les deux gastro-cnémiens sont attachés aux leviers du myographe double; un des nerfs sciatiques est mis à nu. Dans certains cas, au lieu de sectionner la moelle, l'avant-train de l'animal était curarisé pour éviter les mouvements. Un interrupteur électrique donnant des interruptions de fréquence variable est disposé de façon à interrompre un courant de pile; ce courant actionne un appareil de Du Bois-Reymond qui donne des chocs d'induction variant de 1 à 40 environ par seconde. Une disposition appropriée enregistre les interruptions du courant inducteur. Les électrodes sont bifurquées et conduisent le courant à la moelle et au nerf sciatique. Des interrupteurs sont placés sur leur trajet de façon à pouvoir exciter à volonté :

Le nerf seul;

La moelle seule;

La moelle et le nerf simultanément.

Avec cette disposition, quand on excite le nerf seul, le muscle gastro-cnémien du côté correspondant est seul excité; quand on excite la moelle seule, les deux nerfs sciatiques et les deux gastro-cnémiens sont excités simultanément et théoriquement les excitations des deux côtés sont égales ; quand on excite à la fois la moelle et le nerf, les deux côtés sont excités à la fois, mais l'excitation doit être plus forte du côté correspondant au nerf excité. Les effets observés dans ces conditions sont les suivants *quand l'intensité du courant est assez forte* [1].

1° La fusion des secousses a lieu plus rapidement pour le nerf moteur que pour la moelle. Ainsi, avec une intensité = 35 de l'appareil, il fallait, avec l'excitation de la moelle, plus de 20 excitations par seconde pour avoir la fusion complète, tandis qu'avec l'excitation du nerf moteur, elle était complète à 11,5 excitations par seconde. On pourrait supposer que cette différence tient simplement à une différence d'intensité d'action du courant, la moelle représentant un cylindre plus volumineux que le nerf et par suite déterminant une diminution de densité du courant qui la parcourt, mais cette explication est en désaccord avec les faits physiologiques et il est facile de démontrer que cette cause ne peut avoir aucune influence. Je me contenterai de citer à l'appui

1. L'intensité du courant induit variait de 20 à 35 de l'appareil de Du Bois-Reymond. Le fait est essentiel à noter parce que, comme on le verra plus loin, les résultats sont différents avec des courants faibles.

l'expérience suivante : on met à nu, par exemple, le nerf sciatique d'une patte de grenouille et après l'avoir isolé, on le place sur les électrodes de façon à faire l'excitation *immédiate;* on obtient ainsi, en graduant l'excitation, une série de secousses d'une certaine amplitude; qu'on excite alors de la même façon le même nerf, mais en le plaçant sur les électrodes, non plus *isolé* comme tout à l'heure, mais en contact avec une masse musculaire ou même entouré par cette masse musculaire (excitation *médiate*), on n'observera pas de différence dans l'amplitude et la forme des secousses; les résultats seront identiques dans les deux cas. C'est, du reste, ce qui arrive dans l'expérience relatée plus haut; les secousses produites par l'excitation du nerf moteur et celles produites par l'excitation de la moelle ont exactement la même amplitude et la même forme.

2° Si on continue l'excitation tétanisante sur le nerf moteur, le tétanos finit par disparaître au bout d'un certain temps, le plateau descendant peu à peu et régulièrement vers la ligne de repos. En continuant l'excitation tétanisante de la moelle, les phénomènes sont différents; le tétanos, complet ou incomplet, s'arrête beaucoup plus vite et il survient des séries de secousses plus ou moins incomplètement fusionnées et plus ou moins régulières. Il n'y a qu'à jeter un regard sur la figure 4, pl. XVII, qui représente les effets d'une excitation tétanisante prolongée de la moelle.

3° Fréquemment, après la cessation des excitations de la moelle, qu'elles aient été ou non tétanisantes, il survient des contractions

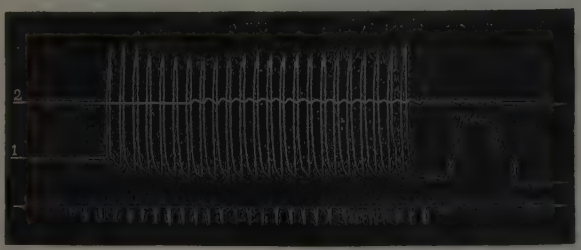


Fig. 50. — Secousses et contraction consécutive provoquées par l'excitation de la moelle [1].

1. Ligne supérieure, 2; secousses du gastro-cnémien dont le nerf a été préparé. — Ligne moyenne, 1; secousse du gastro-cnémien dont le nerf est intact; on y voit les contractions consécutives. — Ligne inférieure; les excitations y sont indiquées; à cause de l'imperfection de l'appareil interrupteur, les premières et les dernières interruptions étaient inefficaces, le contact ne se produisant pas.

irrégulières ayant un tout autre caractère que celles qui sont déterminées pendant l'excitation. On en voit un exemple dans la figure 50. On y voit, sur la ligne moyenne, d'abord une série de secousses très régulières, d'égale amplitude et égales au nombre des interruptions (voir la légende de la figure), puis dès que les excitations intermittentes ont cessé, une contraction consécutive de forme toute différente et qui rappelle tout à fait certaines formes de contraction réflexe déjà étudiées plus haut. J'aurai occasion de revenir plus loin sur ce fait à propos des phénomènes d'arrêt.

Fig. 51. — Contractions provoquées par l'excitation des centres nerveux (encéphale) [1].

Je n'ai pu chez la grenouille constater le fait observé chez le lapin par Kronecker et Hall (*Arch. für Physiologie,* 1879, p. 11). En excitant la moelle (coupée au-dessus du centre respiratoire), ces auteurs ont vu qu'au delà de 20 excitations par seconde, le nombre des secousses musculaires restait le même, tandis qu'en excitant le nerf moteur, le nombre des secousses était toujours égal au nombre des excitations. Chez la grenouille j'ai toujours vu le nombre des secousses musculaires être rigoureusement égal au nombre des excitations de la moelle absolument comme dans l'excitation directe du nerf moteur ou du muscle.

Quand les courants employés

1. Ligne supérieure, 2; contraction du fléchisseur. — Ligne inférieure, 1; contraction du gastro-cnémien.

pour l'excitation des centres nerveux sont plus faibles, le résultat est différent et le caractère des contractions varie suivant la hauteur à laquelle a lieu l'excitation. Voici ce qu'on observe le plus habituellement.

Quand les électrodes sont appliquées sur le cerveau (hémisphères cérébraux ou tubercules bijumeaux), on a des contractions irrégulières qui prennent assez facilement la forme d'un tétanos incomplet et sont souvent précédées d'une contraction initiale intense (*fig.* 51). Si on augmente l'intensité de l'excitation, le tétanos peut devenir parfait et les secousses irrégulières peuvent même disparaître complètement.

L'excitation du bulbe et de la partie supérieure de la moelle détermine des secousses irrégulières ayant à peu près les mêmes caractères que les précédentes, mais qui m'ont paru avoir moins de tendance à se fusionner. Cependant dans certaines conditions, ces secousses peuvent se fusionner en un tétanos presque complet (*fig.* 52).

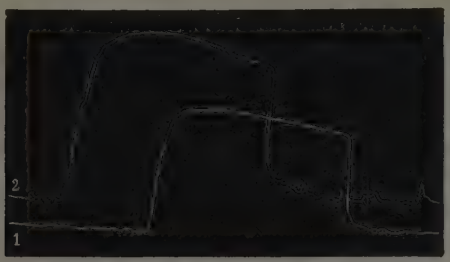


Fig. 52. — Tétanos provoqué par l'excitation de la partie supérieure de la moelle [1].

Au-dessous, dans la partie moyenne et inférieure de la moelle, on a une série de secousses irrégulières plus ou moins prolongées ; le tétanos est toujours très imparfait à moins que l'intensité de l'excitation ne soit très considérable.

Enfin à la partie tout à fait inférieure de la moelle, dans la région correspondante à l'origine des nerfs moteurs du membre inférieur, on retrouve le tétanos pur identique à celui qu'on obtient par l'excitation directe de ces nerfs.

Les phénomènes ne se présentent pas toujours aussi régulièrement. Il peut arriver par exemple que les contractions irré-

1. 1, contraction du gastro-cnémien ; 2, contraction du fléchisseur.

gulières consécutives à la cessation de l'excitation se montrent dans toute la hauteur de l'axe nerveux. Il en est de même de la tendance des secousses à prendre la forme tétanique et de la con-

Fig. 53. — Contractions provoquées par l'excitation de la partie moyenne de la moelle.

traction initiale. Mais les deux faits essentiels qu'on peut considérer comme constants, sont les suivants :

1° Le tétanos pur, classique, ne se produit que par l'excitation de la région de la moelle qui correspond à l'origine des racines motrices qui fournissent les nerfs des membres inférieurs. Dans tout le reste des centres nerveux, à moins de forcer outre mesure l'intensité du courant, on n'obtient que des secousses incomplètement fusionnées;

2° Ces secousses incomplètement fusionnées prennent plus facilement le caractère tétaniforme quand on excite les parties supérieures de l'axe nerveux que quand on excite les parties situées plus bas.

En employant le langage de la clinique, on pourrait formuler ainsi la loi des contractions centrales pour les muscles des membres inférieurs :

Excitation de l'encéphale; convulsions cloniques tétaniformes;

Excitation de la moelle; convulsions cloniques;

Excitation de la région d'origine des racines motrices; tétanos pur.

La difficulté, pour ne pas dire l'impossibilité de localiser rigoureusement l'excitation électrique, vu la petitesse des centres nerveux de la grenouille, ne permet pas d'aller plus loin dans les conclusions à tirer des expériences faites sur cet animal. Il ne faut pas penser chez elle à exciter à part la substance grise et la

substance blanche, les hémisphères et les tubercules bijumeaux, comme on peut le faire sur le chien par exemple, ou sur tout autre animal de grande taille. Ici l'on ne peut agir que sur des régions très limitées anatomiquement, mais physiologiquement très vastes et qui comprennent certainement un grand nombre de centres fonctionnels. Mais au point de vue où je me place dans ce travail, cette difficulté n'a plus la même importance.

Je n'agiterai pas ici la question de savoir sur quels éléments des centres nerveux agit l'excitation électrique ; je me contenterai de faire une seule remarque à ce sujet. On a vu plus haut que sauf des cas très rares, le tétanos pur, classique, ne se produit que par l'excitation de la partie inférieure de la moelle ; il est très probable que dans ce cas ce sont les racines motrices qui sont excitées directement ; peut-être faut-il aussi admettre une excitation efficace des grosses cellules motrices décrites par Birge dans les cornes antérieures (*Archives de Du Bois-Reymond*, 1882, p. 481). Quoi qu'il en soit, du moment que les excitations, quand elles sont portées plus haut, produisent des contractions de forme différente, il faut bien admettre que d'autres éléments ont été excités. Quels sont ces éléments ? Sont-ce des fibres nerveuses ou des cellules et dans quelles parties de l'axe nerveux sont-elles situées ? Je me contente ici de poser la question sans chercher à la résoudre. Il me suffit pour le moment de constater le fait de l'existence dans les centres nerveux d'éléments excitables autres que les racines motrices et leurs cellules d'origine.

On a vu plus haut que, lorsqu'on augmente l'intensité du courant, l'excitation de la moelle, à toutes les hauteurs, peut produire le tétanos. Les faits précédents rendent très vraisemblable que dans ce cas le courant a diffusé jusqu'aux origines des racines motrices et que c'est l'excitation de ces racines qui a déterminé le tétanos.

Il est cependant des cas dans lesquels cette interprétation ne paraît pas pouvoir être invoquée. Il peut arriver en effet qu'en employant des excitations faibles, mais intermittentes et de fréquence assez grande, telles que celles que donne l'appareil de Du Bois-Reymond, il peut arriver, dis-je, qu'on obtienne un tétanos très pur (*fig.* 52). Je reviendrai plus tard sur ce fait.

Les résultats fournis par les sections transversales de la moelle à différentes hauteurs concordent sur beaucoup de points avec les résultats fournis par l'excitation électrique.

Une section transversale au niveau des hémisphères cérébraux, des tubercules bijumeaux ou du bulbe donne une contraction très variable comme forme et assez irrégulière, mais qui a constamment le caractère tétaniforme, comme on le voit dans la figure 54. En outre, au moment de la section, il se produit une

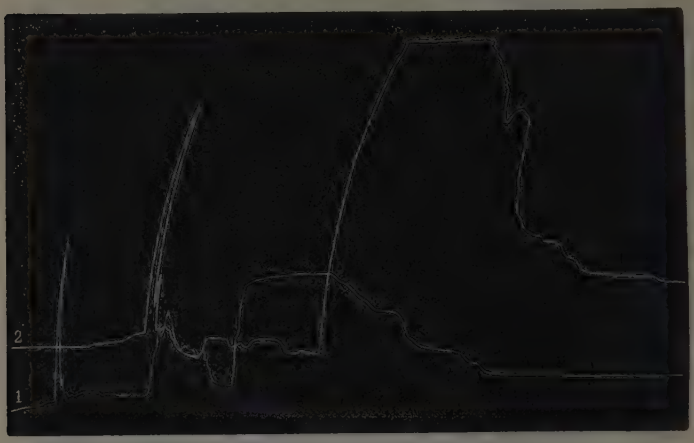


Fig. 54. — Contraction par la section transversale du bulbe [1].

forte secousse initiale et c'est seulement après, et quelquefois même assez longtemps après que se montre le raccourcissement tétaniforme. Cette contraction initiale se retrouve, du reste, à toutes les hauteurs de la moelle.

A la partie supérieure et à la partie moyenne de la moelle, les contractions consécutives à la section ont un autre caractère. A la secousse initiale succède une contraction irrégulière, rarement tétaniforme, dont la figure 55 peut donner une idée (contractions situées à la gauche de la figure).

A la partie inférieure de la moelle, au niveau des origines des racines motrices des membres inférieurs, apparaissent des contractions fibrillaires dissociées, irrégulières, très multipliées et qui se prolongent plus ou moins longtemps après la section (*fig.* 55 : contractions situées à la droite de la figure).

Enfin, au-dessous de ces noyaux d'origine, on n'a plus qu'une

1. La section a porté dans ce cas à 3 millimètres au-dessous du bord inférieur du cervelet. 1, contraction du gastro-cnémien; 2, contraction du fléchisseur.

secousse simple, identique à celle qu'on obtient par la section du nerf moteur.

En résumé, tant des effets de l'excitation électrique que de

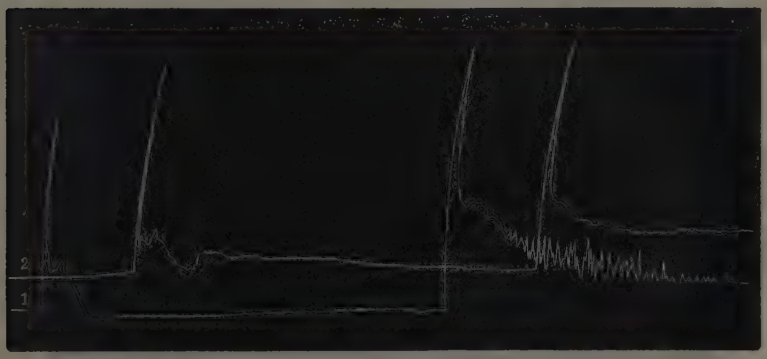


Fig. 55. — Contractions consécutives à la section transversale de la moelle[1].

ceux de l'excitation mécanique des centres nerveux de la grenouille, on peut tirer les conclusions suivantes.

Les contractions consécutives à l'excitation des centres nerveux se composent de deux parties :

1° Une secousse initiale immédiate ;

2° Une contraction ou une série de contractions consécutives.

La *secousse initiale* se produit au moment même de l'excitation et se montre pour toutes les hauteurs de l'axe nerveux. Elle a partout le même caractère et la même forme et est analogue à la secousse obtenue par l'excitation pure et simple des racines motrices ou des nerfs moteurs.

La *contraction consécutive* ne se montre qu'après le début de l'excitation et souvent même après la cessation de l'excitation. Cette contraction change de caractère et de forme suivant la hauteur à laquelle a lieu l'excitation de l'axe nerveux. Dans la région encéphalique, elle a l'aspect tétaniforme sans arriver cependant au tétanos parfait. Dans les régions supérieure et moyenne de la moelle, elle est irrégulière et sa courbe, toujours plus ou moins dentelée, a la forme, tantôt d'une secousse un peu allon-

1. 1, contraction du gastro-cnémien ; 2, contraction du fléchisseur. Les contractions à gauche de la figure ont été provoquées par la section de la partie moyenne de la moelle ; celles de droite par la section de la partie inférieure.

gée, tantôt d'une série de deux ou trois secousses inégales. Dans la région tout à fait inférieure enfin, la contraction consécutive se compose de secousses très courtes, dissociées, qui s'éteignent peu à peu et durent un temps plus ou moins long. Ces secousses sont souvent précédées d'une contraction irrégulière analogue à celle des régions supérieure et moyenne de la moelle.

D'où viennent ces différences dans la forme de la contraction et quelle peut en être l'interprétation ?

Si je prends d'abord la contraction initiale, le premier fait qui frappe, c'est l'analogie de cette contraction avec la secousse qu'on obtient par l'excitation directe du nerf moteur, et comme cette contraction initiale s'observe pour l'excitation à toutes les hauteurs, on est porté à admettre que des fibres motrices qui proviennent des racines antérieures, soit directement, soit après avoir traversé les cellules motrices ganglionnaires, remontent jusqu'à l'encéphale, et que ces fibres motrices peuvent être excitées absolument comme les nerfs moteurs eux-mêmes. L'existence de ces fibres motrices est du reste en accord avec les données physiologiques courantes; elles constitueraient les voies de transmission entre les centres moteurs encéphaliques et les muscles. Cette interprétation soulève cependant une difficulté. Si des fibres motrices existent ainsi dans toute la hauteur de l'axe nerveux, comment des excitations intermittentes ne produisent-elles pas toujours le tétanos comme on l'obtient par les excitations intermittentes portées sur les nerfs moteurs ou sur les racines motrices ?

Il faut remarquer d'abord que, dans un certain nombre de cas, ce tétanos s'observe en réalité, comme on en a vu un exemple dans la figure 52. Mais dans les cas où il ne se produit pas, il faut faire intervenir, à mon avis, des actions d'arrêt dont j'ai déjà donné et dont on trouvera plus loin de nombreux exemples. Ce sont ces actions d'arrêt qui, mises en jeu par l'excitation, empêchent ce tétanos de se produire, l'enrayent ou l'arrêtent quand il a commencé et donnent à la contraction ces formes irrégulières que j'ai décrites et qui ne sont que l'expression de la lutte engagée entre les influences excitantes et les influences d'arrêt.

Quant aux variations dans la forme des *contractions consécutives,* elles seraient dues dans cette hypothèse soit à des différences d'intensité des actions excitantes et des actions d'arrêt, soit à des différences d'excitabilité des fibres nerveuses. C'est ainsi

que le caractère tétaniforme des contractions encéphaliques peut s'expliquer par l'augmentation d'excitabilité des fibres motrices au voisinage des centres moteurs encéphaliques, de même que l'excitabilité plus grande des racines motrices s'explique par le voisinage de leurs cellules d'origine.

Restent les *contractions fibrillaires,* les secousses dissociées qui suivent l'excitation de la partie inférieure de la moelle. Ces secousses ressemblent beaucoup à celles qu'on remarque après l'arrachement d'un nerf moteur. Par cet arrachement, les filets nerveux intra-musculaires sont brisés irrégulièrement à une certaine distance de leur terminaison en plaques motrices, comme on peut s'en assurer au microscope, et les muscles sont alors agités de contractions fibrillaires qui durent assez longtemps. L'excitation des noyaux d'origine des racines motrices produit le même effet. Il semble que les cellules qui les composent soient inégalement excitées, de sorte qu'au lieu d'une excitation *en bloc* qui produirait une contraction d'ensemble, on a une série de petites contractions successives [1].

En résumé, on aurait donc dans l'axe nerveux, *eu égard aux mouvements des membres inférieurs,* les appareils nerveux suivants:

1° Des centres moteurs encéphaliques;

2° Des conducteurs reliant ces centres aux muscles soit directement, soit par l'intermédiaire de cellules ganglionnaires;

3° Des centres moteurs médullaires;

4° Des conducteurs rattachant ces centres aux muscles;

5° Des appareils d'arrêt, ou mieux des influences d'arrêt échelonnées dans toute l'étendue de l'axe nerveux [2].

Si on compare maintenant la contraction centrale à la contraction réflexe, et il suffit pour cela de jeter un coup d'œil sur les tracés, on voit immédiatement qu'il y a une grande analogie entre les deux espèces de contractions. A part les contractions fibrillaires caractéristiques mentionnées plus haut, toutes deux présentent en effet la même forme irrégulière et variable de leur tétanos, si bien que, dans la plupart des cas, si l'on n'était pas prévenu, l'inspection seule des tracés ne permettrait pas de distinguer leur provenance.

1. En examinant ces contractions fibrillaires, on ne peut s'empêcher de les comparer au tremblement de la paralysie agitante.

2. On verra plus loin, dans la seconde partie, ce qu'il faut penser de ces appareils d'arrêt.

D. — Contraction volontaire.

Les faits que je viens de décrire peuvent-ils servir à interpréter le mécanisme de la *contraction volontaire?* Je m'arrêterai un instant sur cette question. Je commencerai par rappeler que toutes mes expériences ont porté exclusivement sur la grenouille. Or, que faut-il entendre par contraction volontaire chez la grenouille? Il semble au premier abord que la question n'ait même pas besoin d'être posée; mais quand on y réfléchit, on s'aperçoit bien vite qu'il n'en est pas ainsi.

Chez l'homme, la distinction entre les mouvements volontaires et les mouvements involontaires est facile à faire. Voici un hémiplégique. Je lui dis de fléchir la jambe et il ne peut y arriver malgré tous ses efforts; je lui chatouille légèrement la plante du pied; la jambe se fléchit immédiatement. Je sais, par expérience, la différence qu'il y a entre le mouvement irréfléchi qui succède à une douleur vive, à celle par exemple qui viendra me surprendre à l'improviste, et le mouvement réfléchi par lequel j'évite un danger qui me menace. Je puis, par un simple acte de volonté, et sans y être déterminé par un autre motif que le désir de faire acte de volonté, je puis faire un mouvement, fléchir l'avant-bras, fermer la main, me déplacer dans tel ou tel sens.

Ce n'est pas ici le lieu d'examiner si, au fond de ces mouvements dits volontaires, il n'y a pas un simple mécanisme réflexe plus complexe que celui des réflexes ordinaires. En restant dans la limite des faits, ce qui caractérise le mouvement volontaire, c'est qu'entre l'excitation qui le provoque et le mouvement lui-même se placent un ou plusieurs actes intellectuels; c'est qu'il est précédé d'une délibération dont nous avons conscience et qui en permet ou en arrête l'exécution.

En outre, tous les faits physiologiques et pathologiques nous autorisent à placer dans les hémisphères cérébraux les appareils organiques de cette délibération.

Chez les animaux supérieurs, nous concluons, par analogie, à l'existence de mouvements volontaires comme chez l'homme. Quand nous voyons chez eux des mouvements se produire sans provocation extérieure appréciable ou quand le mouvement, au lieu de suivre immédiatement l'excitation, n'a lieu qu'après un certain temps pendant lequel l'animal *hésite* avant de se décider,

nous admettons un mouvement réfléchi, distinct des mouvements réflexes, bien qu'en réalité il ne soit peut-être que cela. D'un autre côté, l'extirpation des hémisphères cérébraux supprime chez eux tous ces mouvements réfléchis d'apparence volontaire et transforme les animaux en un pur mécanisme réflexe et automatique.

Chez la grenouille, il n'en est pas tout à fait de même et la différence entre les mouvements involontaires, réflexes ou automatiques et les mouvements volontaires s'efface de plus en plus, de sorte que la ligne de démarcation entre les deux est à peu près impossible à établir. En outre l'extirpation des hémisphères cérébraux ne produit pas chez elle les mêmes effets que chez les animaux supérieurs. Contrairement, en effet, à plusieurs expérimentateurs, j'ai constaté fréquemment que l'ablation des hémisphères cérébraux ne détermine absolument aucun phénomène particulier chez la grenouille, à part les suites immédiates de l'opération. Au bout de très peu de temps, la cicatrisation de la plaie a lieu, habituellement sans accidents, et si on place alors l'animal dans un aquarium avec des grenouilles intactes, il est impossible à des personnes non prévenues de les distinguer les unes des autres. J'en ai conservé ainsi plus d'une année et j'ai fait constater le fait plus d'une fois aux élèves qui fréquentent mon laboratoire. Chez les grenouilles *en captivité*, il semblerait, d'après ces expériences, que les hémisphères cérébraux sont absolument sans utilité. Je dis chez les grenouilles en captivité, car il pourrait très bien se faire que, chez les grenouilles en liberté, cherchant leur nourriture et évitant leurs ennemis, en un mot luttant pour l'existence, les phénomènes fussent tout autres. Il est très probable que, dans ces conditions, les grenouilles privées d'hémisphères se trouveraient dans un état d'infériorité vis-à-vis des grenouilles intactes. Pour avoir, chez la grenouille captive, les phénomènes que l'on observe chez le lapin ou chez le pigeon après l'ablation des hémisphères, il faut que la lésion dépasse les hémisphères cérébraux et entame la couche optique ou les tubercules bijumeaux.

Quoi qu'il en soit, ce qui est certain, c'est que chez la grenouille il est très difficile de savoir exactement si l'on a affaire réellement à un mouvement volontaire. La chose devient encore plus difficile, sinon impossible, quand il s'agit, comme dans ces recherches, d'étudier la forme de la contraction musculaire.

Quand on fait subir à l'animal la préparation nécessaire pour prendre le tracé de la contraction, on le soumet à une série d'excitations qui se renouvellent tout le temps qu'il reste fixé sur la planchette du myographe et, dans ces conditions, toutes les contractions qui se produisent peuvent être attribuées à ces excitations et être considérées comme purement réflexes. J'ai essayé, à plusieurs reprises, d'avoir le tracé de contractions volontaires et je n'ai jamais pu le faire, du moins d'une façon certaine; il me restait toujours du doute sur la nature de la contraction que j'enregistrais. En tout cas, ces contractions ressemblaient absolument comme forme aux contractions réflexes ou à celles qu'on obtient par l'excitation des centres nerveux. Il y aurait donc dans ce cas une grande analogie entre la contraction réflexe et la contraction volontaire. Reste à savoir s'il y a plus qu'une analogie de forme et si elle s'étend jusqu'à la nature même de la contraction. On peut se demander aussi jusqu'à quel point ces résultats sont applicables aux animaux supérieurs. Mes expériences ne me permettent pas jusqu'ici de trancher cette question.

DEUXIÈME PARTIE

SUR LES PHÉNOMÈNES D'ARRÊT.

J'ai étudié, dans le chapitre précédent, les formes de la contraction musculaire et ses variations suivant les conditions diverses de l'excitation. Ces formes peuvent, comme on l'a vu, se rattacher à deux types fondamentaux, la contraction directe et la contraction réflexe. La première est caractérisée par sa régularité et sa relation étroite avec l'excitant, comme mode d'apparition, comme durée et comme intensité, la seconde par son irrégularité, la variabilité de ses caractères et son indépendance relative vis-à-vis de l'excitant.

A quoi tient cette différence ? Pour ma part je crois que ces différences tiennent essentiellement, comme j'essaierai de le démontrer, à des actions d'arrêt qui se produisent spécialement à la traversée des centres nerveux, actions d'arrêt qui modifient d'une façon remarquable la forme de la contraction, particulièrement celle de la contraction tétanique. C'est ce que j'ai cru pouvoir formuler ainsi[1] : *La contraction musculaire réflexe n'est qu'une contraction directe modifiée par des actions d'arrêt.*

Mes recherches, qui n'avaient d'abord pour objet que la forme de la contraction musculaire, se sont trouvées singulièrement élargies par l'intervention de ces phénomènes d'arrêt et j'ai été amené ainsi, presque sans le vouloir, à les étudier d'une façon spéciale. C'est le résultat de ces recherches et des réflexions qu'elles m'ont suggérées qui se trouve consigné dans ce chapitre. Je voudrais, dans ce travail, donner une idée générale de ces actions d'arrêt et montrer, en me basant, soit sur mes expériences, soit sur les expériences antérieures, le rôle que jouent ces phénomènes d'arrêt dans la physiologie de l'innervation ; j'essaierai aussi d'indiquer à grands traits l'application qui peut en être faite à la médecine et à la psychologie.

1. Voir les notes adressées à l'Académie des sciences et à la Société de biologie.

Je ne me dissimule pas que cette étude est remplie de difficultés. Malgré les nombreuses recherches faites sur ce sujet et quoique les travaux récents de Wundt et de Brown-Séquard y aient fait entrer un peu de lumière et aient ouvert des horizons nouveaux, les actions d'arrêt représentent encore une des parties les plus obscures de la physiologie. C'est une raison peut-être pour accueillir avec faveur une tentative qui a pour but de mettre un peu d'ordre dans une question encore si mal connue [1].

Je commencerai d'abord par rappeler les formes principales de ces actions d'arrêt et leurs diverses manifestations, *en ne m'occupant pour le moment que des phénomènes de mouvement* et plus spécialement des phénomènes réflexes. Ces formes peuvent se rattacher aux catégories suivantes qui constituent une sorte de classification des phénomènes d'arrêt.

1° *Il peut y avoir interruption d'un mouvement commencé ou en cours d'exécution, que ce mouvement soit volontaire, automatique ou réflexe.* Les faits de ce genre sont tellement connus que je crois inutile d'y insister. La terreur clouera un homme au sol et l'empêchera de fuir le danger qui le menace ; une forte émotion peut suspendre une inspiration commencée; un sifflement doux fait cesser le ronflement d'un dormeur et modifie momentanément son rythme respiratoire, etc., etc. Les exemples abondent et l'on n'a que l'embarras du choix. Ces actions d'arrêt s'exercent aussi bien dans le domaine pathologique que dans le domaine physiologique, et la thérapeutique médicale les emploie journellement. Quelques gouttes d'eau jetées à la figure, l'odeur d'une plume brûlée, la compression de l'ovaire feront disparaître une attaque de nerfs. Le même effet se produit aussi, même dans les cas de contractions anciennes et permanentes. Ainsi les contractures des hystériques peuvent cesser par l'irritation du tendon du muscle contracturé (Richet, *Physiologie des muscles et des nerfs,* p. 472), par l'immersion dans l'eau froide, etc. La simple suggestion, telle que celle qu'on produit dans l'état hypnotique, a suffi pour guérir définitivement des contractures hystériques anciennes et qui avaient résisté à tous les moyens ordinaires.

2° *Le mouvement en cours d'exécution peut, au lieu d'être interrompu tout à fait, être simplement affaibli ou diminué dans*

1. J'emploie indifféremment dans ce travail les termes *arrêt* ou *inhibition*. C'est de ce dernier que se sert Brown-Séquard dans ses remarquables recherches sur ce sujet.

son intensité, sa vitesse ou sa durée. Ce cas rentre en partie dans le précédent et n'a pas besoin d'autre développement. Il n'y a là qu'une différence de degré.

3° *Le mouvement n'est pas empêché, mais il peut être simplement retardé dans son apparition.* Ici il peut se présenter deux cas :

a) *Ou bien le mouvement se produit pendant que l'excitation qui le détermine continue encore à se faire.* Ainsi je suppose qu'on emploie une excitation tétanisante (une série de chocs d'induction par exemple) appliquée sur un nerf sensitif ou sur la peau ; la contraction réflexe, au lieu de se produire comme d'habitude immédiatement après le début de l'excitation, ne se produit qu'après un temps plus ou moins long. Il est bien entendu que, dans ces expériences, il faut se mettre en garde contre les phénomènes d'*addition latente* et employer d'emblée des excitations d'intensité suffisante pour être efficaces dans les conditions ordinaires. Habituellement, ce cas se combine avec le précédent, en ce sens que la contraction, en même temps qu'elle est retardée, se trouve aussi affaiblie. Quelquefois cependant il arrive que les contractions sont d'autant plus violentes que leur retard est plus prononcé. Les figures 30 et 42 donnent des exemples de ces contractions *retardées*.

b) *Ou bien le mouvement se produit après la cessation de l'excitation.* Ce cas, qui se présente fréquemment, est très intéressant et mérite toute l'attention de l'expérimentateur. Bien souvent, en effet, on serait tenté de prendre le mouvement produit pour un mouvement volontaire ou spontané et je m'y étais trompé moi-même dans les premiers temps. L'erreur est d'autant plus facile que la forme de ces contractions est absolument identique à celle des contractions qu'on peut considérer comme volontaires. Mais avec un peu d'attention, on se convainc facilement que cette contraction consécutive est sous la dépendance directe de l'excitation. Il faut noter, en outre, que la contraction est bien réellement produite par la cessation de l'excitation tétanisante ; c'est cette cessation qui en est la cause déterminante. C'est ce que démontre bien l'examen du tableau de la page 106 auquel je ne puis que renvoyer.

L'expérience suivante donne un exemple très net de ces *contractions consécutives*. Je détruis sur une grenouille le cerveau (hémisphères et tubercules bijumeaux) avec le scalpel et un stylet

mousse; l'hémorrhagie est insignifiante. Le nerf sciatique *droit* est mis à nu et placé sur les électrodes et ce nerf est excité par des courants *constants* interrompus tétanisants. Tant que j'excite ce nerf, il n'y a pas de contraction réflexe dans les muscles de la patte *gauche;* mais dès que je cesse l'excitation, il se fait un mouvement d'écartement des orteils de la patte gauche, mouvement très régulier. Ce mouvement cesse dès que je recommence à exciter et reprend dès que je cesse l'excitation, et cela plusieurs fois de suite. Le courant était fourni par quatre éléments de pile, d'une force électro-motrice de un Volt, et le nombre des excitations était de 10,5 par seconde. Il ne pouvait s'agir dans ce cas d'actions d'induction unipolaire.

Il peut se faire que l'excitation intermittente produise à la fois des contractions pendant l'excitation et des contractions après la cessation de l'excitation, et j'ai eu occasion de constater le fait plusieurs fois.

Je serais porté à croire que ces contractions consécutives ont été souvent prises pour des contractions volontaires. C'est ainsi que les graphiques donnés par Ch. Richet (*loc. cit.*, fig. 98, 99 et 100) me paraissent rentrer dans cette catégorie, quoique l'auteur les considère comme des tracés de mouvements volontaires. Quelquefois, en effet, elles se produisent assez longtemps (plusieurs secondes) après la cessation de l'excitation (*contractions tardives*), ce qui rend plus facile encore la confusion avec un mouvement volontaire. Il faut remarquer aussi que ces contractions consécutives se montrent non seulement après la cessation de l'excitation électrique, mais encore *après la cessation d'excitations purement mécaniques,* telles que les frottements, les percussions, les piqûres, etc.

Pour l'interprétation de ces faits, je ne puis que renvoyer à ce que j'ai dit page 116. Cette contraction consécutive n'est que le dégagement de la *réserve d'excitation* accumulée dans les nerfs par les actions d'arrêt. Quand ces actions d'arrêt ont moins d'intensité, la contraction, au lieu de se produire *après,* peut se produire *avant* la cessation de l'excitation tétanisante.

4° *Les actions d'arrêt peuvent empêcher un mouvement de se produire.* Il y a là évidemment une difficulté. Quand on excite un nerf dans le but de déterminer une contraction musculaire et que la contraction attendue ne se produit pas, on n'est pas en droit pour cela d'attribuer cette absence de mouvement à une

influence d'arrêt. Elle peut tenir en effet à d'autres causes, à une diminution d'excitabilité par exemple ou à une condition expérimentale particulière. Il est cependant des cas dans lesquels le doute n'est pas possible et dans lesquels il s'agit bien évidemment d'actions d'arrêt. C'est ainsi que la frayeur pourra empêcher un mouvement *voulu,* nécessaire même pour le salut de l'individu. Lewison a produit chez le lapin des paralysies réflexes des extrémités postérieures par la contusion des viscères abdominaux. Chez la grenouille, on observe des faits analogues; je n'ai pas constaté chez elle, il est vrai, de paralysies permanentes ; mais j'ai vu souvent des paralysies temporaires, générales ou partielles, à la suite d'excitations sensitives, en un mot de véritables paralysies réflexes d'inhibition. Ch. Richet a mentionné des faits analogues dans la séance de la Société de biologie du 7 juillet 1883. Il ne serait pas difficile de trouver des cas semblables chez l'homme. Ce qu'on appelle *choc* en chirurgie n'est probablement pas autre chose qu'un phénomène du même ordre, mais avec une généralisation et une intensité exceptionnelles. Un certain nombre de paralysies observées en médecine rentrent évidemment dans cette catégorie et sont dues à la prédominance des actions d'arrêt sous l'influence d'une excitation.

C'est à un fait du même genre qu'il faut rattacher ce qu'on observe dans les expériences mentionnées précédemment sur la contraction réflexe. Quand on applique sur un nerf mixte une excitation faible, un courant électrique par exemple, on obtient, si l'excitation est juste *suffisante,* une contraction *directe,* mais la contraction *réflexe* ne se produit pas; elle n'a lieu que si on augmente l'intensité de l'excitation. A quelle cause rattacher ce phénomène? On pourrait être tenté d'invoquer l'excitabilité moindre des nerfs sensitifs ; mais cette opinion a contre elle les faits expérimentaux, les nerfs sensitifs étant au contraire plus excitables que les nerfs moteurs. Il ne peut s'agir non plus d'une *perte* due à la transmission par une longueur plus grande de nerf. Il ne reste donc plus qu'une cause à invoquer, et cette cause, ce sont précisément ces actions d'arrêt.

A ces paralysies par excitation des appareils d'arrêt correspondent les contractures par destruction de ces appareils ou par abolition de leur activité. Ici les faits sont moins connus et plus difficiles à interpréter. Faut-il y faire rentrer le cas suivant qui me paraît du reste intéressant à plusieurs points de vue? Le 7 mai

1880, je détruis le cerveau chez une grenouille en introduisant un stylet mousse dans la cavité crânienne. Après l'opération, l'expérience du coassement de Goltz réussit très bien. L'animal ne présente rien de particulier les jours suivants ; il a l'attitude ordinaire des grenouilles privées de cerveau. Le 16 juin, en la saisissant pour l'examiner, elle est prise d'une contracture tétanique généralisée, mais portant surtout sur les membres postérieurs, le tronc et la tête ; les membres postérieurs sont raides, étendus, comme dans l'empoisonnement strychnique ; la tête, au contraire, est renversée en arrière ; les membres antérieurs sont beaucoup moins contracturés et encore mobiles, de façon que l'animal marche en se traînant à l'aide des pattes de devant par un mode de progression très curieux. Cette attaque ne cessa qu'au bout de quelques minutes. Les jours suivants, le même phénomène se reproduit ; dès qu'on la touchait, l'attaque tétanique avait lieu. Mais à partir du 22, elle diminua d'intensité et les accès cessèrent tout à fait à partir du 25. Le courant constant, quel que fût le sens du courant, une forte constriction d'un orteil ou d'un doigt, la suspension de l'animal la tête en bas, n'avaient aucune influence sur la marche de ces accès tétaniques. Les accès ne se produisaient pas dans les jours qui ont suivi immédiatement l'opération. Ce cas n'est pas le seul que j'aie observé chez la grenouille après l'extirpation ou la destruction du cerveau ; mais c'est celui dans lequel les phénomènes se sont montrés avec le plus de netteté. L'interprétation de ces faits est assez obscure et l'on pourrait peut-être faire intervenir une excitabilité plus grande des centres moteurs due à l'inflammation de la moelle consécutive à l'opération ; mais dans ce cas il me semble que ce seraient les centres moteurs des membres antérieurs qui auraient été pris les premiers et avec le plus d'intensité et non, comme dans le cas actuel, ceux des membres postérieurs. En outre, les phénomènes n'auraient pas attendu 40 jours pour se montrer. Je crois que dans ce cas il faut faire intervenir une autre cause. Pendant les 40 jours qui ont précédé l'attaque, les mouvements de l'animal étaient normaux et le fonctionnement médullaire régulier. L'équilibre existait donc entre les actions motrices et les actions d'arrêt, et jusque-là les appareils d'arrêt contenus dans la moelle suffisaient pour régulariser l'activité des centres moteurs, la vie motrice de l'animal étant du reste réduite au minimum. Mais il y avait là un équilibre instable, la destruction des appareils d'arrêt cérébraux

créant au profit des actions motrices une inégalité qui pouvait se révéler d'un moment à l'autre. Que ces actions motrices médullaires vinssent à s'exagérer pour une cause quelconque, les influences modératrices de la moelle ne devaient plus suffire à les contre-balancer et les phénomènes convulsifs devaient se produire. Pourquoi maintenant ces phénomènes ne se sont-ils montrés que le quarantième jour et pourquoi ont-ils duré 10 jours seulement? La réponse est assez difficile et je n'entamerai pas une discussion sur ce point. Je ne veux retenir de cette expérience qu'un seul fait, c'est l'influence de la destruction des appareils d'arrêt cérébraux sur la production des contractures.

Dans cette hypothèse, de même qu'on est conduit à admettre des paralysies par abolition de l'activité des appareils moteurs et des paralysies par augmentation d'activité des appareils d'arrêt, il faudrait admettre aussi des contractures par augmentation d'activité des appareils moteurs et des contractures par diminution d'activité des appareils d'arrêt. Il y a là une distinction qui pourra sans doute trouver son application en clinique et sur laquelle doit se porter l'attention des médecins.

5° *Les actions d'arrêt peuvent modifier la forme de la contraction.* La forme de la contraction dépend de son amplitude et de sa vitesse et des modifications de cette vitesse et de cette amplitude à chaque instant de la contraction. Or ces modifications, comme on l'a vu plus haut, peuvent être produites par des actions d'arrêt. Il me paraît difficile d'expliquer autrement les formes variables et multiples de la contraction et du tétanos réflexes. Lorsqu'on voit une excitation tétanisante produire, au lieu de la courbe pure et régulière du tétanos classique, une courbe inégale comme amplitude et variable comme forme, on est bien obligé d'admettre qu'à certains moments l'excitation tétanisante se trouve annulée, contre-balancée, en tout ou en partie, par une cause agissant en sens contraire, et quel autre nom donner à cette cause que le nom d'action d'arrêt ou d'inhibition?

Dans cette théorie, tous les faits s'expliquent d'eux-mêmes et s'enchaînent facilement. C'est ainsi que, comme on l'a vu plus haut, pour un certain degré d'excitation, la contraction réflexe ne se produit pas; dans ce cas, elle est enrayée totalement par les actions d'arrêt. Pour un degré d'excitation plus fort, mais faible encore, les influences d'arrêt ne suffisent plus pour contre-balancer les actions motrices déjà plus puissantes, et la contraction réflexe

se produit, quoique peu intense encore ; puis à mesure que l'excitation augmente de force, les influences motrices prédominent de plus en plus et la contraction réflexe, augmentant toujours d'intensité, se rapproche de plus en plus de la contraction directe, de façon qu'on peut obtenir tous les degrés de transition. Mais n'y a-t-il pas là toujours la même cause, c'est-à-dire cette influence d'arrêt qui peut, soit empêcher la contraction réflexe, soit, quand elle n'est pas assez puissante pour cela, en modifier simplement les caractères, et n'est-on pas en droit de dire, comme j'ai cru pouvoir le faire, que la contraction réflexe n'est qu'une contraction directe modifiée par des actions d'arrêt ?

6° *Les actions d'arrêt peuvent diminuer l'excitabilité motrice de la substance nerveuse.* Cette diminution d'excitabilité peut s'observer aussi bien sur les centres nerveux que sur les nerfs périphériques. Ces faits ont déjà été mentionnés en particulier par Brown-Séquard. J'ai constaté moi-même plusieurs fois une diminution de l'excitabilité motrice de la moelle sous l'influence de la préparation des nerfs de la patte du même côté. Un fait de ce genre a déjà été indiqué page 115. La figure 50 en donne un exemple (voir page 127). Le nerf d'une des pattes était mis à nu et placé sur les électrodes pour pouvoir l'exciter directement ; le nerf de l'autre patte restait intact. Dans ces conditions l'excitation de la moelle donnait des contractions dans les deux gastro-cnémiens droit et gauche ; mais, tandis que les contractions du gastro-cnémien dont le nerf n'avait pas été touché avaient l'amplitude normale (ligne inférieure), celle du gastro-cnémien opposé (ligne supérieure), dont le nerf avait été préparé, étaient très faibles et à peine indiquées ; quelquefois même elles manquaient tout à fait. Ceci ne pouvait tenir à une diminution d'excitabilité du nerf moteur lui-même par la préparation, car en l'excitant directement, les secousses obtenues avaient la même amplitude que celle du gastro-cnémien du côté opposé.

Pour les nerfs périphériques, les expériences de Wundt et de Richet parlent dans le même sens.

7° *Il peut se produire, au lieu d'un raccourcissement, un allongement réflexe du muscle sous l'influence d'une excitation.* Ces faits n'ont pas été étudiés jusqu'ici, à ma connaissance du moins, car l'allongement admis par Gad au début de la contraction musculaire est un phénomène d'un tout autre ordre. J'ai constaté ce fait dans une expérience que je donnerai à cause de l'importance

théorique qu'elle présente. Une grenouille à cerveau intact est préparée de la façon ordinaire sur la planchette du myographe de Marey; le tendon du gastro-cnémien gauche est attaché au levier du myographe. Les électrodes métalliques sont recouvertes de fragments d'éponge imbibée d'eau salée et appliquées sur la membrane natatoire de la patte droite. Je fais passer alors les courants tétanisants de l'appareil de Du Bois-Reymond avec une intensité = 30. Au moment où l'excitation a lieu, ou plutôt un peu après son début, comme on peut le voir sur la figure 56, où

Fig. 56. — Allongement réflexe du muscle sous l'influence d'une excitation.

F indique le début de l'excitation tétanisante, il ne se produit rien autre chose qu'un très léger allongement du muscle, bien visible sur le tracé; puis au moment de la cessation de l'excitation tétanisante, ou plutôt un peu après, il se produit une violente secousse réflexe. Avec l'extra-courant, le même fait se reproduisit, mais une seule fois, tandis qu'il se montrait constamment avec les courants induits. La secousse de rupture produite par l'extra-courant était plus forte, quelquefois double et s'accompagnait d'un cri. Je sectionnai alors les hémisphères en respectant les tubercules bijumeaux; dans ces nouvelles conditions, l'excitation tétanisante ne produisit plus ni allongement à la fermeture, ni contraction à la rupture; seulement au début de l'excitation tétanisante, la grenouille se mit à coasser et le coassement continua tout le temps de l'excitation pour cesser avec cette excitation elle-même. Je sectionnai alors en arrière des tubercules bijumeaux; la section fut suivie d'un raccourcissement considérable permanent et l'excitation tétanisante de la peau détermina alors une contraction tétaniforme réflexe (*fig.* 57), qui commença de suite après le début de l'excitation, F, et se continua un certain temps après sa cessation, R.

J'ai cité cette expérience dans son entier parce qu'elle me paraît instructive au point de vue des phénomènes d'arrêt. Il me semble que l'interprétation en est la suivante. A l'état normal, les muscles ont toujours un certain degré de tension (tonicité musculaire) qui n'est pas autre chose qu'une contraction réflexe légère, permanente, due très probablement à l'excitation incessante des cellules motrices de la moelle par les nerfs sensitifs

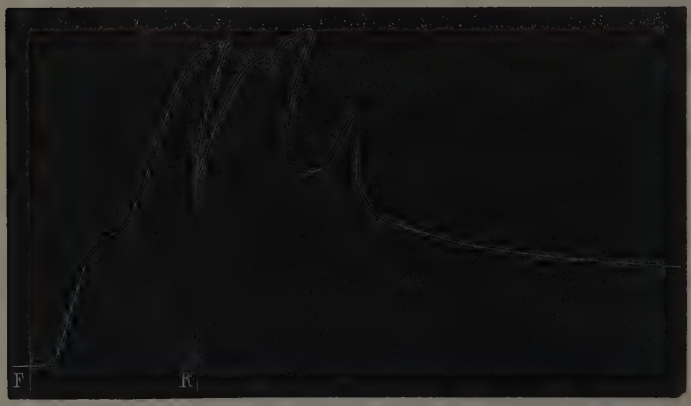


Fig. 57. — Contraction réflexe tétaniforme consécutive à l'excitation de la peau.

(musculo-tendineux ?). Sous l'influence de l'excitation électrique de la peau, les appareils d'arrêt et les centres moteurs sont excités à la fois ; mais l'action des premiers prédominant dans ce cas, on a une diminution d'activité des centres moteurs et un relâchement du muscle ; puis l'excitation cessant, les influences d'arrêt cessent d'agir et les phénomènes d'addition latente se produisant dans les centres moteurs, la contraction consécutive a lieu à la fin de l'excitation. Après la section des tubercules bijumeaux, c'est-à-dire après la suppression d'une grande partie des appareils d'arrêt, ce qui reste de ces appareils dans la moelle ne suffit plus pour contrebalancer l'activité des centres moteurs ; cette activité devient prédominante ; de là le raccourcissement considérable consécutif à la section et ensuite la contraction réflexe tétaniforme qui accompagne l'excitation.

On se demandera pourquoi ces actions d'arrêt se produisent avec telle excitation et non avec telle autre. Il est difficile de

répondre à cette question ; nous ne pouvons que constater le fait. Il y a là peut-être une différence d'excitabilité des deux espèces d'appareils. Ainsi, dans cette expérience, l'extra-courant détermina une seule fois un léger allongement du muscle à la fermeture, une autre fois un très léger raccourcissement, dans les autres cas rien du tout, tandis que la cessation de l'excitation s'accompagnait toujours d'une secousse et d'un cri.

Telles sont, en se basant sur l'examen des faits, les sept catégories dans lesquelles on peut faire rentrer, au moins jusqu'à nouvel ordre, les phénomènes d'arrêt, en tant qu'il s'agit de phénomènes de mouvement.

Étudions maintenant leurs caractères généraux en nous arrêtant spécialement sur les points les plus importants.

Le *point de départ* des actions d'arrêt peut se trouver soit dans les centres nerveux, soit dans les nerfs périphériques.

Pour les centres nerveux, les faits sont aujourd'hui bien connus depuis les expériences de Setschenow et des auteurs qui l'ont suivi. L'excitation directe de ces centres détermine des actions d'arrêt et une diminution d'activité des phénomènes moteurs. Cette excitation peut du reste être soit électrique, soit chimique, soit mécanique et le même effet peut être produit, d'après Weill et Luchsinger, par la dyspnée et le manque d'oxygène dans le sang. Tout le monde sait du reste l'influence paralysante de certaines émotions sur les mouvements.

Mais dans les conditions physiologiques ordinaires, le point de départ se trouve habituellement dans la périphérie sensitive. Toute excitation sensitive peut, dans certaines conditions, déterminer des actions d'arrêt. Le fait a été démontré pour les nerfs de la sensibilité générale, pour les nerfs des sens spéciaux, pour les nerfs tendineux, pour les nerfs sympathiques et toutes mes expériences le confirment. D'après Setschenow, il est vrai, les sensations purement tactiles ne produiraient jamais de phénomènes d'arrêt ; pour lui, il faut que la sensation s'élève jusqu'à la douleur ; mais l'observation donne un démenti à cette assertion et il n'est même pas besoin pour cela d'une expérience bien délicate. Je me contenterai de citer un seul fait. Comment expliquer autrement que par une action d'arrêt l'expérience suivante, bien connue du reste, et que chacun peut répéter facilement. Si vous prenez une grenouille intacte bien vivace, et que vous essayiez de la mettre sur le dos, elle se retourne immédiatement ; mais si vous la

maintenez un certain temps dans cette position et que vous souleviez la main, elle y reste quelques minutes sans faire un mouvement. Il n'y a pourtant là que des excitations tactiles très légères et pas d'excitations douloureuses. On pourrait, il est vrai, invoquer une autre interprétation et admettre que l'immobilité de l'animal tient à la frayeur ou au sentiment qu'il a de son impuissance au bout de quelques efforts infructueux. Mais ce qui prouve que ces causes ne suffisent pas, c'est que l'expérience ne réussit pas quand au lieu de maintenir l'animal sur le dos avec la main, on l'y maintient avec un linge recouvert d'une capsule de verre ou de porcelaine; dès qu'on soulève la capsule, la grenouille se retourne immédiatement. Pour qu'elle conserve la situation anormale qui lui a été donnée, il faut que des contacts légers, que des pressions multiples, telles qu'elles peuvent être faites par la main, répondent aux tentatives de l'animal et en enrayent les contractions. Du reste, ce qui prouve bien que la frayeur ou tout autre acte intellectuel ne sont pour rien dans le phénomène, c'est que l'expérience réussit très bien et plus facilement encore sur les grenouilles privées d'hémisphères. Il serait bien facile d'ailleurs de trouver d'autres exemples d'actions d'arrêt consécutives à des excitations tactiles.

Je parlerai plus loin des actions d'arrêt dans les nerfs moteurs périphériques.

Les *conditions* dans lesquelles se produisent les actions d'arrêt et qui en déterminent les caractères d'apparition, de durée, d'intensité, etc., sont très imparfaitement connues, et jusqu'ici il m'a été impossible de trouver, je ne dirai pas une loi, mais simplement un fil conducteur qui permît de se guider et de se reconnaître. L'étude attentive des expériences antérieures ne peut conduire non plus à aucun résultat positif à ce point de vue. L'acte le plus étudié jusqu'à présent, l'arrêt du cœur par l'excitation du pneumo-gastrique, est encore aussi obscur pour nous que le premier jour, et cependant c'est un phénomène que nous pouvons reproduire à coup sûr et graduer à volonté, et il est loin d'en être ainsi pour la plupart des actions d'arrêt.

Je ferai remarquer que dans les cas énumérés ci-dessus, les actions d'arrêt peuvent se présenter sous deux conditions différentes. Tantôt c'est la même excitation nerveuse qui détermine à la fois des actions motrices et des actions d'arrêt, ces dernières pouvant simplement affaiblir ou au contraire empêcher les pre-

mières; tantôt l'excitation nerveuse qui détermine l'action d'arrêt agit sur un mouvement produit par un autre nerf ou par une autre région nerveuse. Dans le premier cas, un seul point nerveux est excité; dans le second, l'excitation motrice et l'excitation modératrice partent de deux nerfs différents, et la seconde agit à distance sur la première. C'est cette seconde catégorie d'actions d'arrêt qui a été la plus étudiée; mais la première n'en existe pas moins et on en trouve un exemple dans l'excitation des nerfs périphériques.

Cette question mérite de nous arrêter un instant à cause de l'importance qu'elle présente pour la théorie générale de l'innervation. Je n'ai pas à revenir sur les nerfs sensitifs périphériques; j'en ai parlé plus haut à plusieurs reprises à propos de la contraction réflexe. J'ai montré, je crois, que toutes les fois qu'on excite un nerf sensitif, la forme de la contraction réflexe qui succède à l'excitation est due au dégagement d'influences d'arrêt. Mais ces influences d'arrêt se produisent très probablement beaucoup plus dans les centres nerveux, dans les cellules ganglionnaires, que dans les filets nerveux eux-mêmes. Pour savoir si des actions d'arrêt se produisent dans les nerfs périphériques eux-mêmes, il fallait donc s'adresser aux nerfs moteurs, de façon que la transmission nerveuse n'eût pas à se faire à travers des cellules. Les premières recherches de ce genre, à ma connaissance du moins, ont été faites par Wundt. J'en donnerai un bref résumé à cause de leur importance.

Quand on excite un nerf par un courant constant, il se produit *à l'anode* une *onde d'arrêt* (*Hemmungswelle*) qui se reconnaît à la diminution de l'excitabilité du nerf et qui se propage lentement des deux côtés de l'anode en diminuant graduellement d'intensité et de vitesse; en même temps se produit *au cathode* une *onde d'excitation* (*Erregungswelle*) qui se propage des deux côtés du cathode avec une vitesse et une intensité plus grandes. Un nerf excité se trouve donc parcouru à la fois par une onde d'arrêt et par une onde d'excitation, et son excitabilité qui se mesure par l'amplitude de la contraction, par sa durée et par la durée de la période d'excitation latente n'est que la résultante algébrique de ces deux actions contraires. A la *rupture* du courant, les effets inverses se produisent. C'est au cathode que se montre l'onde d'arrêt, à l'anode, l'onde d'excitation, sauf pour les courants faibles pour lesquels l'onde d'arrêt de fermeture persiste encore à l'anode.

Partant de ces principes, Wundt formule ainsi les lois de l'excitation nerveuse pour la fermeture et pour la rupture du courant.

« L'excitation extérieure qui se produit par suite de la fermeture du courant est une fonction des actions excitantes et des actions d'arrêt que ce courant détermine. Les valeurs positives de cette fonction sont comprises entre des limites de temps qui dépendent de la force et de la direction du courant, de sorte que la fonction ne commence à avoir une valeur positive qu'un certain temps très court après la fermeture, et ne prend une valeur négative qu'après un temps plus long.

« L'excitation extérieure qui se produit par suite de la rupture du courant est une fonction en premier lieu des actions excitantes qui sont liées à la compensation des actions d'arrêt produites pendant la fermeture, et en second lieu des actions d'arrêt qui persistent en partie à l'anode et s'accumulent en partie au cathode. La force, la durée et le moment d'apparition de l'excitation de rupture dépendent, suivant la force et la durée du courant, de la vitesse de cette compensation et de l'intensité de l'arrêt à l'anode et au cathode. Cette excitation manque quand l'arrêt ne disparaît que lentement (courants faibles); son apparition est retardée quand l'arrêt accumulé pendant la fermeture persiste longtemps à une intensité notable (courants ascendants après une longue fermeture); enfin sa durée est allongée quand l'arrêt de fermeture est intense et nécessite un temps plus long pour sa compensation (tétanos de rupture). »

Je ne veux pas entrer dans plus de détails sur ces recherches de Wundt; je ne puis que renvoyer à son travail déjà cité et en particulier au chapitre IV (page 223) dans lequel l'auteur donne les courbes de l'excitation et de l'arrêt et de la marche de ces deux actions contraires dans les nerfs à la suite d'une excitation. La seule chose qui m'intéresse ici et sur laquelle je ne saurais trop appeler l'attention, c'est ce fait fondamental *que dans un nerf excité il se produit en même temps deux actions contraires, une excitation et un arrêt et que l'effet de l'excitation n'est que la résultante de ces deux actions.*

C'est ici le lieu de rappeler les différences que j'ai signalées dans le cours de ce travail entre la contraction du muscle curarisé et la contraction du muscle intact (contraction musculo-directe et névro-directe). Ces différences ne peuvent-elles pas s'expliquer par l'existence d'actions d'arrêt dans la contraction névro-directe,

par leur absence dans la contraction du muscle curarisé ? Si dans ce dernier le raccourcissement consécutif persiste plus longtemps après la cessation de l'excitation (page 87), si, quand on continue l'excitation tétanisante, le raccourcissement tétanique dure plus longtemps (p. 88), si ce tétanos est plus régulier (p. 88), n'est-ce pas parce que les actions d'arrêt faisant défaut ne viennent pas enrayer le raccourcissement ; et n'est-ce pas à la même cause qu'il faut rattacher l'absence de contraction initiale (p. 88) ? L'existence d'actions d'arrêt dans les nerfs explique au contraire la rareté du tétanos de fermeture et du tétanos de rupture dans la contraction névro-directe (p. 91), et l'existence de ces secousses additionnelles que j'ai décrites dans la première partie de ce travail (p. 100).

Je ne veux pas entrer ici dans le détail de tous les phénomènes d'arrêt, ni dans la discussion des théories diverses qui ont été données de ces phénomènes. Il est cependant certaines questions auxquelles je suis forcément amené et que les considérations précédentes peuvent servir à interpréter.

Une première question est la suivante. Les phénomènes d'arrêt se passent-ils dans des appareils particuliers ou bien les actions d'arrêt et les actions motrices ont-elles pour siège les mêmes éléments ?

La première opinion a été adoptée par la plupart des physiologistes. C'est ainsi qu'on a admis dans l'appareil nerveux cardiaque des ganglions excitateurs et des ganglions modérateurs ; c'est ainsi qu'on a reconnu dans l'encéphale, puis dans la moelle, l'existence de centres d'arrêt distincts et indépendants. Cette opinion devenue presque classique, a cependant été combattue, surtout dans ces derniers temps. Pour H. Munk, Heidenhain, Bubnoff, Wegele, ce sont les mêmes éléments qui sont le siège des deux actions. Cette opinion trouve un appui dans les recherches de Wundt, et mes expériences me porteraient aussi à me ranger de ce côté. Si, comme on vient de le voir, des actions d'arrêt se passent dans les nerfs périphériques et en particulier dans les nerfs moteurs, il est bien difficile d'admettre dans ces nerfs deux ordres de filets nerveux, des nerfs excitateurs et des nerfs d'arrêt. Je rappellerai du reste que, tout récemment, l'existence dans le cœur de ganglions distincts pour l'excitation et pour l'arrêt a été combattue par Lowit. Je serais donc porté à admettre que les deux actions se passent dans les mêmes éléments.

Dans cette hypothèse, toute excitation nerveuse détermine-

rait dans le nerf excité deux modifications de sens contraire : une modification *positive,* pouvant agir à son tour comme excitant sur la substance nerveuse voisine et ainsi de proche en proche jusqu'au muscle, et une modification *négative*[1] qui tend à détruire ou à annuler la première; et, suivant que l'une ou l'autre de ces modifications prédomine, on aura ou bien un mouvement, ou bien un affaiblissement (ou un arrêt) de ce mouvement. On retrouve déjà des traces de ces phénomènes d'arrêt dans les nerfs moteurs; mais c'est surtout dans les centres nerveux, là où se rencontrent les cellules ganglionnaires, qu'ils se montrent avec le plus d'intensité, et cette intensité augmente à mesure qu'on excite des parties de plus en plus élevées de l'axe nerveux. Aussi le résultat des excitations est-il d'autant plus variable que ces phénomènes d'arrêt sont plus marqués, et on s'explique ainsi les contradictions apparentes qui existent dans les expériences d'excitation du cerveau et les effets différents qu'on obtient d'un moment à l'autre dans le cours d'une expérience. L'hypothèse précédente donne la clef de ces variations inexplicables qui ont fait jusqu'ici le désespoir des expérimentateurs. Peut-être pourrons-nous les interpréter plus tard, quand nous connaîtrons mieux les lois qui régissent les phénomènes d'arrêt.

Il peut sembler étrange au premier abord qu'une même action excitante puisse ainsi dégager deux influences contraires et surtout que ces deux influences aient leur siège dans les mêmes éléments anatomiques, dans la même substance. Mais, en y réfléchissant, la chose n'a rien d'invraisemblable. Il est évident que, dans l'ignorance absolue où nous sommes du processus intime des actions nerveuses, nous ne pouvons faire aucune hypothèse plausible sur la coexistence des actions motrices et des actions d'arrêt. On peut invoquer également une modification chimique, une variation électrique, une vibration ondulatoire ou tout autre mouvement moléculaire, mais toute démonstration rigoureuse est impossible. On me permettra cependant une comparaison qui peut faire comprendre jusqu'à un certain point cette simultanéité d'actions contraires. Supposons par exemple une substance chimique instable dont la décomposition donne naissance à deux corps dont l'un puisse agir comme excitant, soit pour fixer les idées, un acide et une base, l'acide agissant comme excitant. Si

1. J'emprunte ces termes à Wundt.

l'acide est dégagé en excès, l'excitation a lieu; si la base est dégagée en quantité suffisante pour neutraliser l'acide, l'excitation ne se fait pas; si sa quantité ne suffit qu'à neutraliser une portion de l'acide dégagé, l'excitation a encore lieu, mais affaiblie. Quant à la quantité d'acide et de base dégagés, elle peut tenir soit à la composition même de la substance à un moment donné, soit au degré d'alcalinité du milieu. On pourrait tout aussi bien, dans l'hypothèse mécanique, imaginer un système élastique donnant aussi naissance à des actions contraires, ou, dans l'hypothèse physique, un système électrique ou magnétique analogue. Il suffit de montrer que la chose en soi n'a rien d'inadmissible.

Je n'ai parlé jusqu'ici que des actions d'arrêt qui s'exercent sur les fonctions motrices. Mais le phénomène peut et doit être envisagé à un point de vue beaucoup plus général. Si toute stimulation détermine à la fois dans la substance nerveuse des phénomènes d'excitation et des phénomènes d'arrêt, cet arrêt pourra s'exercer sur toute manifestation, quelle qu'elle soit, de l'activité nerveuse et ne se limitera pas à l'activité motrice. C'est en effet ce qu'on observe, quoique cette catégorie de phénomènes ait été moins étudiée. Les sécrétions, par exemple, sont soumises aux mêmes influences d'arrêt et les cas de ce genre sont connus de tous les expérimentateurs. Pour la sécrétion salivaire même, le fait est d'observation courante. Mais des phénomènes analogues se constatent pour toutes les sécrétions. Ainsi l'excitation des nerfs sensitifs de l'uretère par l'introduction d'une canule arrête pendant quelques heures la sécrétion urinaire, comme je l'ai vu chez le lapin. Il en est de même pour la sécrétion pancréatique, la sécrétion biliaire, etc.

L'étude attentive des phénomènes de sensibilité conduirait aux mêmes conclusions, et il ne serait pas difficile de relever un certain nombre de faits tenant certainement aux influences d'arrêt. Des anesthésies et des analgésies, soit locales, soit générales, peuvent être observées à la suite d'irritations périphériques et ne peuvent guère s'interpréter que de cette façon. Je me contenterai de rappeler ici les recherches récentes de Brown-Séquard sur l'anesthésie générale provoquée par l'irritation de la muqueuse du larynx par un courant d'acide carbonique. On trouverait facilement dans la thérapeutique usuelle des cas qui rentreraient dans cette catégorie de phénomènes et sur lesquels le temps ne me permet pas d'insister.

Mais on peut faire encore un pas de plus. Si, comme les faits précédents tendent à le démontrer, la coexistence dans la substance nerveuse d'actions excitantes et d'actions d'arrêt est une loi générale, et si la manifestation qui succède à une stimulation nerveuse n'est que la résultante de deux influences contraires, les éléments nerveux dont l'activité accompagne ou détermine les processus psychiques ne doivent pas échapper à cette nécessité. Quelle que soit l'idée qu'on se fasse des phénomènes intellectuels et de leur mode de production, on ne peut nier, à quelque école philosophique qu'on appartienne, la relation étroite qui rattache ces phénomènes au fonctionnement cérébral. Aussi, dans la théorie émise plus haut, on est forcé d'admettre l'intervention des actions d'arrêt dans les phénomènes psychiques comme dans les fonctions sécrétoires, sensitives ou motrices. On ne voit pas en effet pourquoi la substance corticale des hémisphères se distinguerait à ce point de vue de la substance nerveuse des autres régions. Il n'est pas difficile du reste de trouver des exemples d'actions d'arrêt dans les phénomènes de l'intelligence; je dirai même plus : cette hypothèse éclaire d'un jour nouveau le mécanisme des fonctions psychiques et permet d'interpréter un grand nombre de faits qui sans cela restent absolument inexplicables. Je ne suis pas le premier d'ailleurs à faire jouer aux actions d'arrêt un rôle dans les phénomènes de cet ordre. On a dit déjà que la volonté est une action d'arrêt. Mais jusqu'ici, à mon avis, le problème n'a pas été envisagé à son véritable point de vue, et c'est là surtout ce que je voudrais indiquer.

Le fait essentiel, primordial, qui domine toute la question, c'est cette dualité qui se trouve au fond de tout acte psychique; c'est cette double tendance, à l'activité d'une part, à l'arrêt de cette activité d'autre part, qui fait que l'acte psychique n'est que la résultante de ces deux tendances contraires.

Transportez cette action d'arrêt dans le domaine de la conscience, traduisez-la en langage philosophique et vous aurez l'hésitation qui accompagne un mouvement volontaire ou une détermination intellectuelle; dans la sphère émotive, vous aurez les fluctuations et les alternatives de la passion, ou, dans la sphère de la spéculation pure, les réserves du doute métaphysique. Notre vie intellectuelle n'est qu'une lutte perpétuelle entre ces deux tendances, impulsion et arrêt; *homo duplex.*

Ces deux tendances n'ont pas la même intensité relative chez

tous les individus, et la part de l'impulsion et de l'arrêt présente des variations qui, au point de vue moral, déterminent chez l'homme le *caractère*. La prédominance des actions impulsives donne les caractères résolus, celle des actions d'arrêt les caractères indécis et circonspects.

Je me contenterai de ces considérations. Je n'ai pas voulu étudier ici tous les phénomènes intellectuels, quelque intéressante que puisse être cette étude; il m'a suffi d'indiquer à grands traits le rôle des phénomènes d'arrêt dans les actes psychiques.

Avant de terminer, je voudrais cependant essayer d'appliquer à la clinique les notions développées plus haut sur les actions d'arrêt. Si, comme les recherches mentionnées dans ce travail semblent le démontrer, l'on doit admettre qu'à toute excitation de la substance nerveuse correspondent deux sortes de modifications contraires, la façon dont on doit envisager la pathologie nerveuse sera profondément modifiée.

Soit un centre moteur par exemple. L'activité de ce centre pourra, sous une influence morbide quelconque, être soit abolie, soit surexcitée, de façon à produire, dans le premier cas, une paralysie de la motilité, dans le second, une contracture ou une convulsion. Mais si, dans ce centre moteur, il faut admettre la coexistence d'actions motrices et d'actions d'arrêt, les phénomènes se compliquent. Ces actions d'arrêt, sous une influence morbide, pourront être soit abolies, soit exagérées et produire ainsi soit des convulsions, soit des paralysies, tout à fait différentes quant au mode de production des convulsions et des paralysies ordinaires. On voit dans cette hypothèse comment se pose le problème dans les troubles de la motilité d'origine nerveuse. En présence d'une paralysie, on devra se demander si cette paralysie tient à une abolition des actions motrices ou à une prédominance des actions d'arrêt. De même une contracture pourra reconnaître pour cause soit une exagération des actions motrices, soit une abolition des actions d'arrêt.

Les faits répondent-ils à cette vue théorique? Il me semble difficile de le nier. *Expérimentalement*, on a vu plus haut qu'on peut produire des paralysies motrices par l'exagération des influences d'arrêt. Les contractures par abolition des actions d'arrêt sont beaucoup moins connues; les faits que j'ai observés et dont l'un a été mentionné plus haut (p. 143) me paraissent cependant rentrer dans cette catégorie. *Cliniquement*, on connaît déjà un

certain nombre de faits semblables et une fois l'attention des praticiens éveillée sur ce sujet, il n'est pas douteux pour moi que ces faits ne se multiplient et ne deviennent d'observation courante. Il me suffira ici de mentionner les arrêts du cœur ou le ralentissement de ses battements sous l'influence de l'excitation du pneumo-gastrique ou de ses centres d'origine. Une partie des manifestations multiples de l'hystérie, la plupart des phénomènes si curieux de l'hypnotisme provoqué me paraissent aussi devoir être rattachés à des troubles dans le fonctionnement des actions d'arrêt de l'innervation centrale. Je ne puis m'étendre sur ce sujet qui mériterait à lui seul une étude spéciale. J'ai voulu seulement poser quelques indications générales et appeler sur cette question l'attention des médecins en les engageant à étudier à ce point de vue les faits qu'ils auraient occasion de rencontrer.

Je terminerai en donnant les conclusions principales qui dérivent de ce travail. Je rangerai ces conclusions sous trois catégories : contraction musculaire, phénomènes d'arrêt, phénomènes psychiques.

A. — *Contraction musculaire.*

1° La *secousse musculaire directe* présente la même forme, sauf quelques variations légères, quel que soit le point excité, muscle, nerf moteur ou racine motrice.

2° La forme de la secousse directe reste la même, quelle que soit la nature de l'excitation, sauf en ce qui concerne le raccourcissement consécutif (tétanos de fermeture ou de rupture).

3° Le tétanos de fermeture et de rupture ne se montre qu'avec les courants constants et l'extra-courant et non avec les chocs d'induction simples.

4° Le *tétanos musculo-direct* se distingue du tétanos névro-direct par quelques caractères; le raccourcissement persiste plus longtemps après la cessation de l'excitation; il dure aussi plus longtemps quand on continue l'excitation tétanisante; enfin il s'en distingue par l'absence de contraction initiale qui se présente fréquemment dans le tétanos névro-direct.

5° Le muscle curarisé est moins excitable pour les courants induits tétanisants que le nerf moteur; c'est l'inverse avec les courants constants interrompus.

6° Dans une série de *secousses névro-directes* isolées produites par des excitations intermittentes assez rapprochées, les secousses

initiales et terminales se distinguent fréquemment par leur amplitude soit plus grande, soit plus faible, des secousses intermédiaires. Dans certaines conditions on observe une secousse additionnelle supplémentaire à la fin de la série d'excitations.

7° La forme de la secousse névro-directe ne varie pas, que le nerf soit ou non en connexion avec la moelle.

8° La secousse produite par la section ou par la ligature rapide du nerf moteur est identique comme forme à la secousse produite par l'excitation électrique.

9° L'élongation lente du nerf moteur ne produit aucune secousse; brusque, elle détermine une série de secousses irrégulières.

10° Le tétanos par l'excitation mécanique intermittente du nerf moteur est identique comme forme au tétanos produit par l'excitation électrique.

11° La *contraction radico-directe* (secousse ou tétanos) a la même forme que la contraction névro-directe.

12° La *contraction réflexe* offre des caractères qui la différencient de la contraction directe, qu'elle se présente sous la forme de secousse ou sous la forme de tétanos.

13° La contraction réflexe exige pour se produire une intensité d'excitation supérieure à celle qui détermine une contraction directe.

14° La *secousse réflexe* présente la même forme, sauf quelques variations légères, quel que soit le point excité, périphérie sensitive, nerf sensitif ou racine sensitive.

15° La secousse réflexe se distingue de la secousse directe par son amplitude moindre, sa durée plus longue, l'augmentation de la période d'excitation latente et par l'existence plus fréquente d'un certain degré de contracture consécutive.

16° Le *tétanos réflexe*, ou mieux la contraction tétaniforme qui se produit sous l'influence des excitations tétanisantes, présente une forme beaucoup plus variable que le tétanos direct et n'a jamais la régularité typique de ce dernier.

17° Le tétanos réflexe peut se présenter tantôt sous la forme de secousse simple, quelquefois allongée comme celle des muscles lisses, tantôt sous celle de secousses irrégulières plus ou moins fusionnées, tantôt sous celle de tétanos incomplet, plus rarement enfin sous celle de véritable tétanos, mais qui, même dans ce cas, n'en a jamais la régularité classique.

18° Le tétanos réflexe apparaît plus tard que le tétanos direct et ne se montre très souvent qu'après la cessation de l'excitation tétanisante, à moins que cette excitation ne soit prolongée très longtemps.

19° La durée du tétanos réflexe est indépendante, dans de certaines limites, de la durée de l'excitation tétanisante. Du reste, d'une façon générale, il n'y a pas entre l'excitation et le tétanos réflexe l'étroite relation qui existe entre l'excitation et le tétanos direct.

20° La strychnine modifie la forme du tétanos réflexe et lui imprime les caractères du tétanos direct.

21° Les excitations mécaniques déterminent plus difficilement le tétanos réflexe quand elles sont portées sur le nerf que quand elles sont portées sur la peau ou sur la périphérie sensitive.

22° Les excitations électriques portées sur la peau déterminent plus difficilement les contractions réflexes que les excitations mécaniques ou chimiques.

23° D'une façon générale, les contractions réflexes se produisent d'abord dans les muscles des épaules, du tronc et des bras, puis dans les fléchisseurs de la patte, et en dernier lieu dans le gastro-cnémien. Il faut noter cependant qu'il y a un certain rapport entre les muscles qui se contractent et le point excité.

24° Avec les excitations chimiques de la peau, la contraction réflexe a plus de tendance à prendre la forme du tétanos qu'avec les autres modes d'excitation.

25° Les contractions viscéro-réflexes produites par les excitations mécaniques ont plus de tendance à prendre la forme tétanique que celles qui sont produites par les excitations électriques.

26° L'excitation du cœur, de l'estomac et de l'intestin détermine facilement des contractions réflexes.

27° L'excitation des poumons n'a pas déterminé de contractions réflexes.

28° Il n'existe pas jusqu'ici de loi qui permette d'expliquer les variations de forme de la contraction musculaire réflexe et on ne peut constater aucune relation évidente entre ces formes et les conditions de l'excitation.

29° Les conditions qui déterminent la forme de la contraction réflexe doivent être cherchées dans les centres nerveux.

30° En employant des courants d'intensité moyenne, la fusion des secousses a lieu plus rapidement quand on excite le nerf mo-

teur que quand on excite directement la moelle et le *tétanos médullaire* s'arrête beaucoup plus vite que le tétanos névro-direct.

31° Chez la grenouille, par l'excitation de la moelle comme par celle du nerf moteur, le nombre des secousses est toujours égal au nombre des excitations.

32° En employant des courants faibles, on ne peut produire, par l'excitation de la moelle, le tétanos classique que quand on excite la région d'origine des racines motrices.

33° L'excitation des autres régions de l'axe nerveux ne produit que des secousses incomplètement fusionnées.

34° Ces secousses prennent plus facilement la forme tétanique quand on excite les parties supérieures de l'axe nerveux.

35° La *contraction centrale* présente de grandes analogies de forme avec la contraction réflexe.

36° La forme de la contraction volontaire, autant qu'on peut être certain chez la grenouille d'avoir affaire à un mouvement volontaire, paraît identique à celle de la contraction réflexe.

B. — *Phénomènes d'arrêt.*

1° Les phénomènes d'arrêt qui se passent dans la substance nerveuse peuvent être rangés dans les catégories suivantes, pour ce qui concerne les fonctions motrices :

a) Les actions d'arrêt peuvent interrompre un mouvement commencé, que ce mouvement soit volontaire, automatique ou réflexe;

b) Le mouvement, sans être interrompu, peut être simplement diminué dans son intensité, sa vitesse ou sa durée;

c) Le mouvement peut être retardé dans son apparition, soit qu'il se produise pendant la durée de l'excitation (*contractions retardées*), soit qu'il n'ait lieu qu'après la cessation de l'excitation (*contractions consécutives*);

d) Le mouvement peut être empêché de se produire;

e) Les actions d'arrêt peuvent modifier la forme de la contraction;

f) Les actions d'arrêt peuvent modifier l'excitabilité de la substance nerveuse;

g) Elles peuvent déterminer, au lieu d'un raccourcissement, un allongement réflexe du muscle.

2° Le point de départ des phénomènes d'arrêt peut se trouver soit dans les centres nerveux, soit dans les nerfs périphériques.

3° Toute excitation sensitive peut, sous certaines conditions, déterminer des phénomènes d'arrêt.

4° Ces phénomènes d'arrêt se montrent non seulement dans les centres nerveux, mais encore dans les nerfs périphériques et en particulier dans les nerfs moteurs, quoiqu'ils y aient une bien moindre intensité.

5° Ces phénomènes d'arrêt peuvent servir à interpréter les différences de forme de la contraction musculaire et en particulier du tétanos.

6° La différence de forme du tétanos direct et du tétanos réflexe tient essentiellement aux actions d'arrêt qui se passent dans les centres nerveux. On peut dire à ce point de vue que le tétanos réflexe n'est qu'un tétanos direct modifié par des actions d'arrêt.

7° La strychnine semble agir en paralysant les actions d'arrêt des centres nerveux.

8° Il est probable qu'il n'y a pas d'appareils moteurs et d'appareils d'arrêt distincts et indépendants, mais que les actions motrices et les actions d'arrêt se passent dans les mêmes éléments nerveux.

9° Les actions d'arrêt s'observent non seulement pour les mouvements, mais pour les sécrétions, pour la sensibilité, etc., et d'une façon générale, pour toutes les manifestations de l'activité nerveuse.

10° A un point de vue tout à fait général, l'arrêt est un fait fondamental d'innervation.

11° Toute excitation nerveuse détermine, dans la substance nerveuse excitée, deux modifications de sens contraire, une impulsion à l'activité d'une part et une tendance à l'arrêt de cette activité d'autre part.

12° La manifestation quelconque, mouvement, sensation, sécrétion, etc., qui suit une excitation nerveuse, n'est que la résultante de ces deux actions contraires.

13° Une interprétation satisfaisante des phénomènes d'innervation ne pourra être donnée que quand on aura, pour chaque acte nerveux, fait la part de chacune de ces deux influences contraires.

14° Ces actions d'arrêt jouent certainement un rôle important en pathologie et il importe que l'attention des médecins soit éveillée sur ce point.

15° C'est ainsi qu'il peut y avoir des paralysies par exagération

des actions d'arrêt et des contractures par abolition de ces mêmes actions, paralysies et contractures qui doivent être distinguées avec soin des paralysies et des contractures ordinaires.

16° Les mêmes considérations peuvent s'appliquer aux anesthésies et aux hyperesthésies, ainsi qu'aux troubles des sécrétions.

17° Des expériences ultérieures pourront seules décider si des phénomènes d'arrêt se produisent aussi dans la substance contractile.

C. — *Phénomènes psychiques.*

1° Les phénomènes d'arrêt se montrent dans les actes psychiques comme dans toutes les autres manifestations de l'activité nerveuse.

2° Tout processus psychique est la résultante de deux actions contraires, une action impulsive, une action d'arrêt.

3° Cette dualité se retrouve au fond de toute manifestation psychique, mouvement volontaire, passion, détermination, pensée.

4° La prédominance relative de l'impulsion ou de l'arrêt détermine chez l'homme le caractère.

Nota. — La première partie de ce travail a été présentée à la Société des sciences de Nancy dans sa séance du 21 juillet 1883 (voir la *Revue médicale de l'Est*, t. XV, p. 723); la seconde partie l'a été dans la séance du 15 mars 1884. Le résumé en a été publié dans des notes présentées à l'Académie des sciences (séance du 15 octobre 1883) et à la Société de biologie (séances des 13 octobre 1883 et 1er mars 1884). Un résumé plus étendu en a été donné dans la *Gazette médicale de Paris*, nos 50, 51 et 52, 1883, et 14 et 15, 1884.

TABLE DES FIGURES

Figures dans le texte.

1. Schéma de l'arc réflexe.
2. Secousse du muscle curarisé et du muscle intact.
3. Tétanos de fermeture; muscle curarisé.
4. Contraction de fermeture et de rupture; muscle curarisé.
5. Contraction de fermeture et de rupture; muscle curarisé.
6. Tétanos incomplet du muscle curarisé.
7. Tétanos comparés du muscle curarisé et du muscle intact.
8. Tétanos chimique du muscle curarisé.
9. Fusion des secousses; première phase.
10. Fusion des secousses; deuxième phase.
11. Fusion des secousses; troisième phase.
12. Fusion des secousses; quatrième phase.
13. Fusion complète des secousses; dernière phase.
14. Fusion des secousses; forme ascendante.
15. Contraction initiale plus forte.
16. Contraction terminale plus forte.
17. Contractions initiale et terminale plus fortes.
18. Contraction initiale plus faible.
19. Contraction terminale plus faible.
20. Contractions initiale et terminale plus faibles.
21. Contraction initiale plus forte; contraction terminale plus faible.
22. Contraction initiale plus faible; contraction terminale plus forte.
23. Secousses d'amplitude irrégulière.
24. Secousse terminale additionnelle.
25. Tétanos radico-direct.
26. Secousse radico-réflexe et tétanos radico-direct produits par la même excitation.
27. Tétanos névro-réflexe.
28. Tétanos névro-réflexe.
29. Tétanos névro-réflexe.
30. Contractions périphéro-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien.
31. Contractions réflexes par l'excitation mécanique de la peau de la patte.
32. Contractions réflexes par l'excitation mécanique de la peau de l'anus.
33. Secousse réflexe par excitation mécanique de la peau; gastro-cnémien.
34. Contraction réflexe du gastro-cnémien produite par le pincement de la peau de l'anus.
35. Contraction réflexe du gastro-cnémien produite par le pincement de la peau de l'anus.
36. Contraction réflexe du gastro-cnémien sous l'influence de l'acide acétique à $^1/_{10}$ appliqué sur la peau de la patte.

37. Contraction réflexe du gastro-cnémien sous l'influence de l'acide acétique à $^1/_{100}$ appliqué sur la peau de la patte.
38. Contractions réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de l'acide acétique appliqué sur la peau de la patte.
39. Contractions réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de l'acide acétique appliqué sur la peau de la patte.
40. Contractions réflexes des fléchisseurs sous l'influence de l'acide acétique appliqué sur la peau de la patte.
41. Contraction cardio-réflexe des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence des courants induits.
42. Contraction cardio-réflexe des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence des courants induits.
43. Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence des courants induits.
44. Contractions cardio-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de frottements répétés.
45. Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de frottements répétés.
46. Contractions réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de frottements répétés du gros intestin.
47. Contractions cardio-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de percussions intermittentes.
48. Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien sous l'influence de percussions intermittentes.
49. Contractions stomaco-réflexes des fléchisseurs et du gastro-cnémien par suite de compression.
50. Secousses et contraction consécutive provoquées par l'excitation de la moelle.
51. Contractions provoquées par l'excitation des centres nerveux.
52. Tétanos provoqué par l'excitation de la partie supérieure de la moelle.
53. Contractions provoquées par l'excitation de la partie inférieure de la moelle.
54. Contraction par la section transversale du bulbe.
55. Contractions consécutives à la section transversale de la moelle.
56. Allongement réflexe du muscle sous l'influence d'une excitation.
57. Contraction réflexe tétaniforme consécutive à l'excitation de la peau.

Planches.

Pl. XVII. Fig. 1. Tétanos incomplet; extra-courant. (Voir p. 94.)

Fig. 2. Contractions réflexes du gastro-cnémien sous l'influence de piqûres réitérées de la peau de la patte. (Voir p. 115.)

1, contraction du gastro-cnémien du côté opposé au côté excité. — 2, contractions du gastro-cnémien du même côté.

Fig. 3. Contractions réflexes du gastro-cnémien sous l'influence d'une pression continue de la peau des orteils. (Voir p. 115.)

1, contraction du gastro-cnémien du même côté que le côté comprimé. — 2, Contractions du gastro-cnémien du côté opposé au côté comprimé. — Les orteils sont comprimés d'une façon continue entre les doigts.

Fig. 4. Effets d'une excitation tétanisante prolongée de la moelle.

Pl. XVIII. Fig. 1. Tétanos névro-direct et tétanos névro-réflexe.
TD, tétanos direct; TR, tétanos réflexe; C, prolongation du tétanos réflexe; D, début; F, fin de l'excitation tétanisante.

Fig. 2. Tétanos névro-direct et tétanos réflexe.
TD, tétanos direct; TR, tétanos réflexe; C, prolongation du tétanos réflexe; D, début; F, fin de l'excitation tétanisante.

Fig. 3. Tétanos névro-direct et tétanos réflexe.
TD, tétanos direct; TR, tétanos réflexe; C, prolongation du tétanos réflexe; D, début; F, fin de l'excitation tétanisante.

Pl. XIX. Fig. 1. Tétanos névro-direct et tétanos névro-réflexe. Mêmes indications que pour les figures de la planche XVIII.

Fig. 2. Tétanos névro-direct et tétanos névro-réflexe. Mêmes indications que pour les figures de la planche XVIII.

Fig. 1.

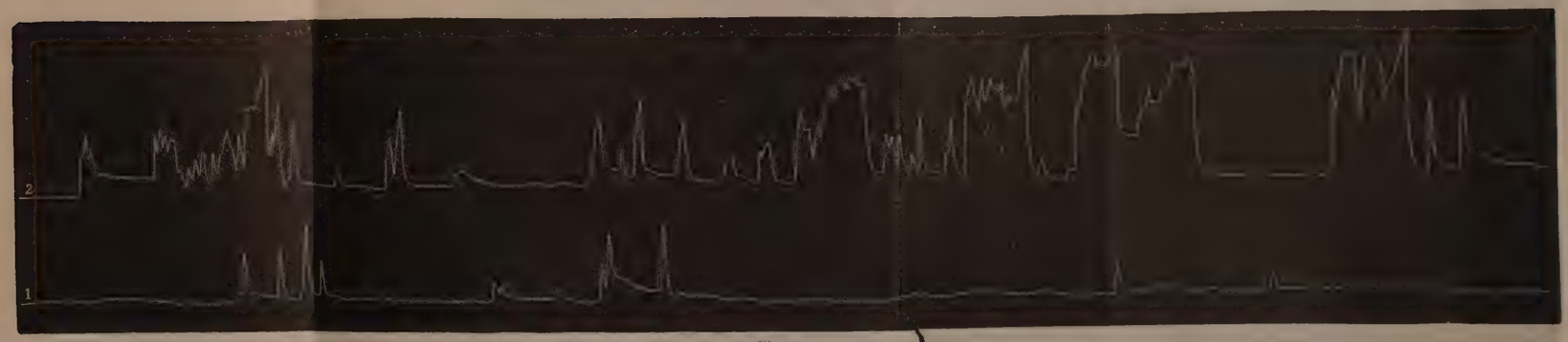


Fig. 2.

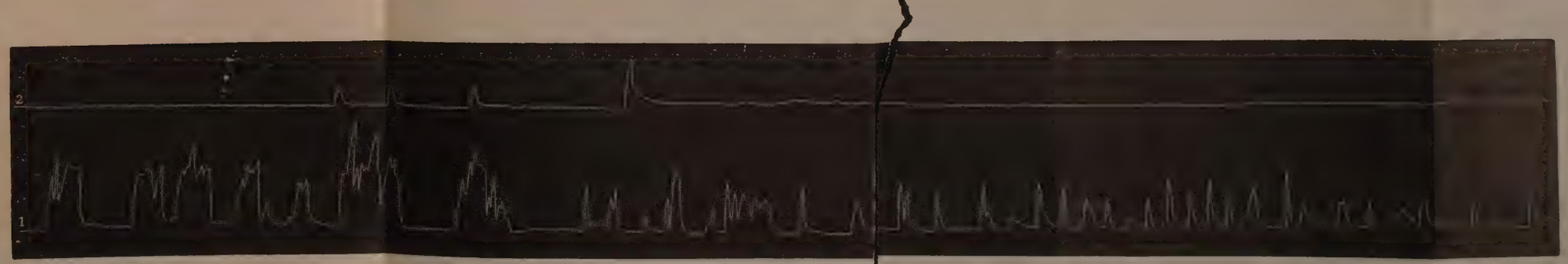


Fig. 3.

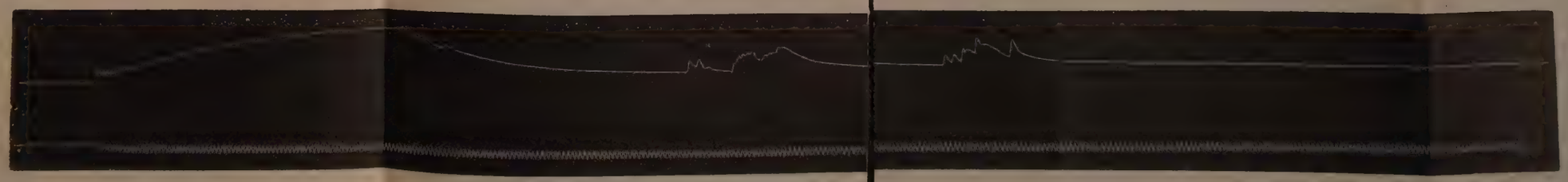


Fig. 4.

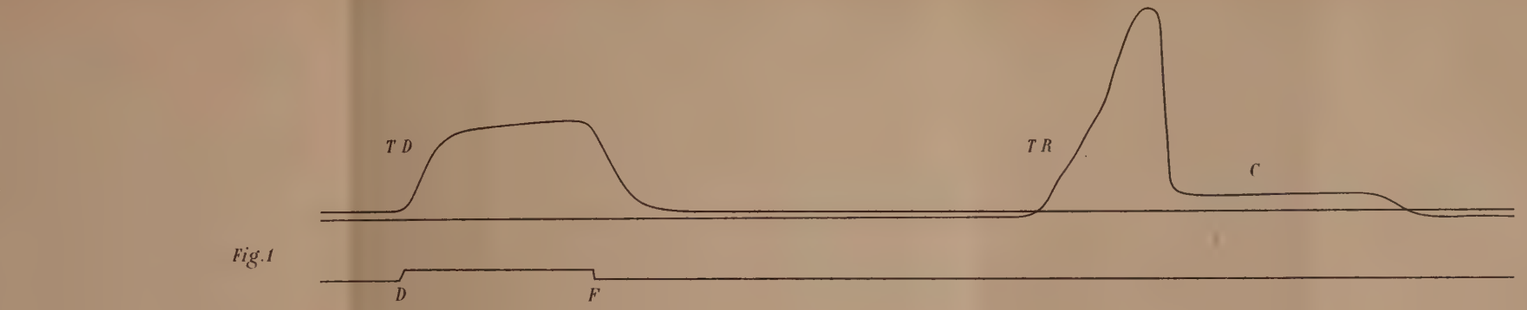


Fig. 1

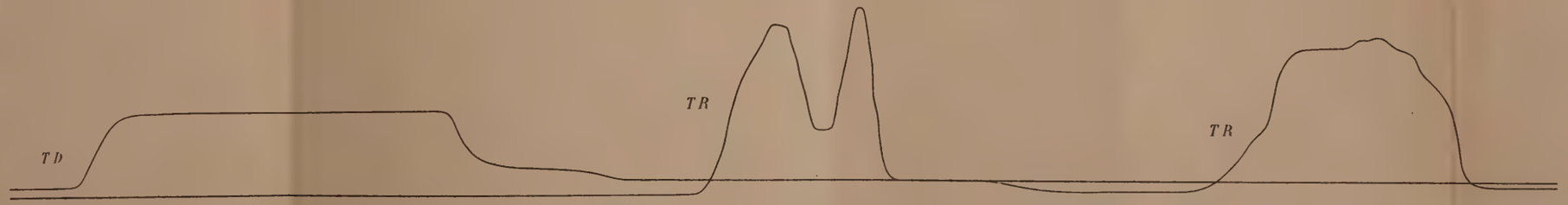


Fig. 2

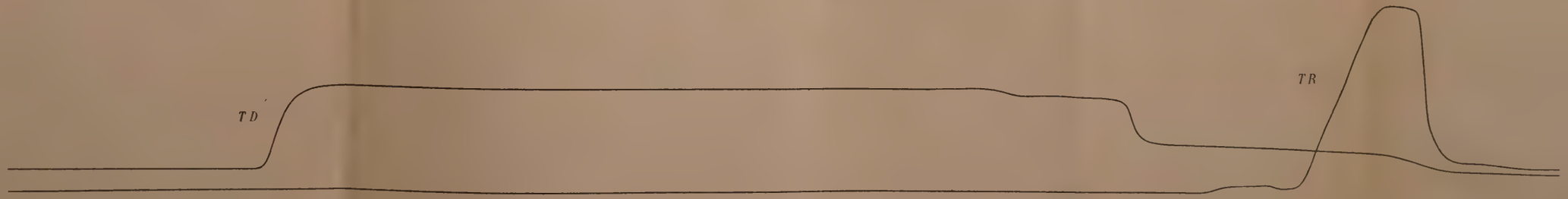
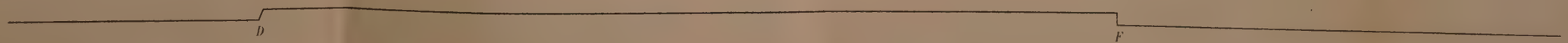


Fig. 3



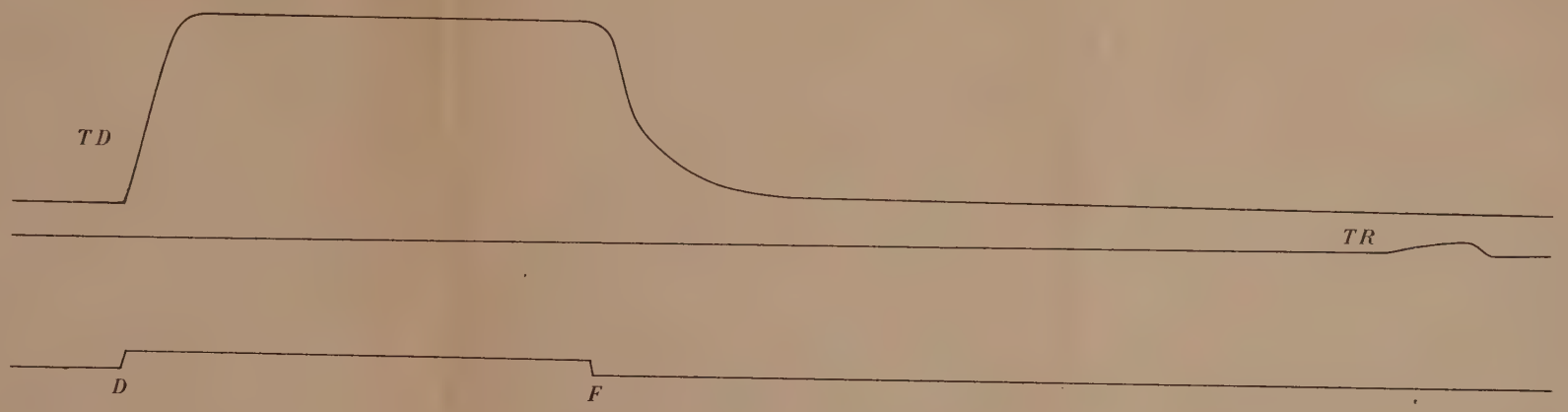


Fig. 1

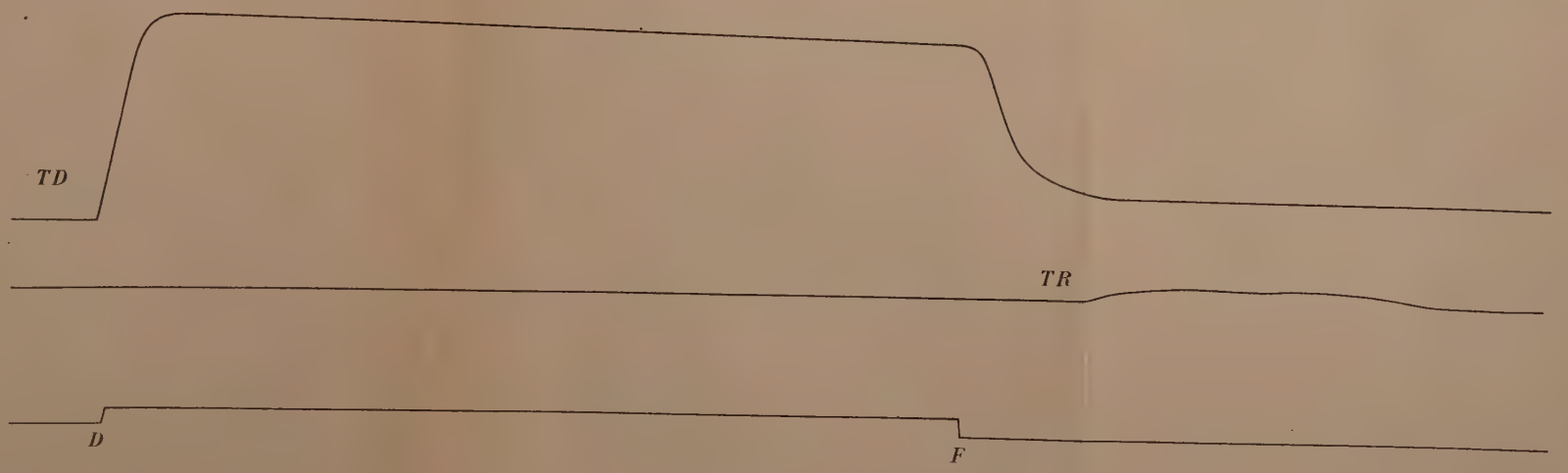


Fig. 2

ÉTUDE CRITIQUE

SUR

LA MÉCANIQUE

Par A. CALINON

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

CHAPITRE Ier.

Notion et mesure du temps.

§ 1er. — *Mouvement.*

1. Plusieurs auteurs, en mathématiques comme en philosophie, admettent la notion du mouvement absolu comme une idée première.

Cette opinion a été très contestée ; quoi qu'il en soit à cet égard, il convient de remarquer qu'au point de vue de la mécanique rationnelle, cette question n'a aucune importance ; le mouvement d'un point, considéré isolément, est une pure conception métaphysique, car, en admettant même qu'on imagine un pareil mouvement, il est impossible de le constater et d'en déterminer les conditions géométriques, par exemple la forme de la trajectoire.

2. Nous nous bornerons donc ici à considérer le mouvement relatif qui, seul, est susceptible d'une définition mathématique et nous dirons :

Un point m est en mouvement par rapport à une figure de forme invariable, lorsque les distances de ce point m aux points

de cette figure varient : la figure en question forme les repères et comme sa forme n'a pas d'importance, nous supposerons que cette figure consiste en trois axes de coordonnées *ox, oy, oz*. Le lieu géométrique des diverses positions du point *m* par rapport aux axes est la trajectoire T de ce point.

3. Supposons maintenant que le système d'axes *oxyz* par rapport auquel on a déterminé la trajectoire T du mobile se déplace lui-même par rapport à un second système d'axes $o'x'y'z'$, le même mobile décrira par rapport à ces nouveaux axes une nouvelle trajectoire T′ qui, d'ailleurs, se déduira géométriquement de la première si la loi du déplacement de *oxyz* par rapport à $o'x'y'z'$ est connue. Il ne faut donc jamais perdre de vue que la trajectoire d'un mobile est relative à un système d'axes *oxyz ;* la première chose à faire dans une question de mouvement, est donc d'indiquer les axes que l'on choisit.

§ 2. — *Notion du Temps.*

4. Considérons dans l'univers deux corps, deux astres, par exemple, décrivant chacun une trajectoire par rapport à un système d'axes : nous appelons positions *simultanées* celles où l'on voit *à la fois* ces deux astres, sans expliquer d'ailleurs autrement le sens de la locution *à la fois* sur lequel tout le monde est bien d'accord.

Soient d'abord deux positions simultanées des deux astres, considérons deux nouvelles positions différentes des premières, mais encore simultanées entre elles ; les secondes positions sont dites *successives* par rapport aux premières.

Ces définitions de la simultanéité et de la successivité des positions de corps en mouvement s'étendent sans difficulté à un nombre quelconque de mobiles.

5. Une propriété fondamentale du fait de la simultanéité, c'est qu'il est indépendant et de la position de l'observateur et du choix des axes ; ainsi, deux positions paraîtront également simultanées à des observateurs quelconques rapportant les mouvements à des axes quelconques.

C'est ce phénomène de la simultanéité et de la successivité qui

constitue pour nous la notion même du temps ; insistons un peu sur ce point.

Dans l'univers, les positions successives des mobiles se révèlent à nous par l'intermédiaire des sens ; c'est ainsi, par exemple, que nous *voyons* les diverses positions des astres lumineux ; chaque *position* correspond donc pour nous à une *sensation*, de sorte que la simultanéité et la successivité des positions ne sont pas autre chose que la simultanéité et la successivité des sensations correspondantes centralisées et comparées entre elles par notre cerveau. L'idée même du temps est donc inhérente au mode de fonctionnement de notre cerveau et n'a de sens que pour des esprits faits comme le nôtre.

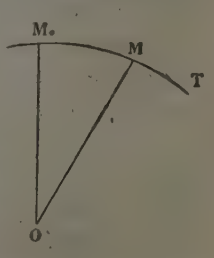
§ 3. — *Le Temps considéré comme grandeur.*

6. Il s'agit maintenant de passer de cette notion du temps à l'idée d'une grandeur mesurable.

A cet effet, prenons sur deux trajectoires A et B des positions initiales simultanées a_0 et b_0 des mobiles, puis des positions variables a et b également simultanées entre elles ; les arcs de trajectoire a_0a et b_0b sont dits simultanés ou décrits simultanément.

Mais, par suite du fait de la simultanéité, nous pouvons déterminer, au moyen de l'observation, la position b qui correspond à chaque position a et, par conséquent, l'arc b_0b qui correspond à chaque valeur de l'arc a_0a ; or, cette correspondance équivaut à une équation entre les arcs a_0a et b_0b.

De même si nous considérons n mobiles, on peut déterminer de la même façon, pour chaque position de l'un d'eux, les positions correspondantes de tous les autres ; de là $n-1$ équations entre les arcs décrits simultanément par ces n mobiles.



7. Cette observation peut se généraliser : soit, en effet, T la trajectoire de l'un des mobiles M par rapport aux axes choisis, les arcs étant comptés à partir d'une position initiale M_0 : joignons le point M à l'origine des coordonnées O ; quand le point M se déplace, le rayon vec-

teur OM prend une valeur déterminée pour chaque position du mobile ; de même, l'aire décrite par ce rayon vecteur, l'angle M_0OM, le rayon de courbure de la trajectoire en M sont autant de grandeurs variables qui, comme l'arc M_0M, prennent des valeurs déterminées pour chaque position M.

Donc, toutes les grandeurs qui se rattachent au mouvement varient *simultanément*, ainsi que les arcs de trajectoires ; le fait de la simultanéité équivaut donc, pour ces grandeurs, à $n - 1$ équations, n étant le nombre de ces grandeurs.

Nous appelons variable principale t la grandeur particulière en fonction de laquelle on exprime les $n - 1$ autres à l'aide de ces $n - 1$ équations ; c'est cette variable principale t, convenablement choisie, que nous adopterons comme mesure du temps, cela, *par définition*.

§ 4. — *De l'angle de la rotation terrestre.*

8. Cette variable principale choisie pour mesurer le temps est, comme on sait, l'angle de la rotation de la terre par rapport aux étoiles fixes prises comme repères : nous allons examiner si ce choix est réellement justifié.

Plusieurs auteurs ont essayé de définir des temps égaux ; leurs définitions reviennent toutes à la suivante :

Deux phénomènes de mouvement sont dits de *même durée* quand ils se produisent dans des conditions identiques, mais non simultanément.

Le mot conditions est peut-être un peu vague, mais il n'est évidemment question ici que des conditions *mécaniques*, la force, la vitesse, l'accélération, la force vive, etc.

Il faut donc, d'après cela, pour mesurer le temps, constater l'identité de ces diverses grandeurs dans deux mouvements non simultanés : or, cette constatation est impossible pour la vitesse, l'accélération et les autres grandeurs qui en dérivent, puisqu'on ne peut mesurer des vitesses, par exemple, qu'à la condition d'avoir une mesure du temps.

Mais on objectera peut-être qu'il suffit, dans les deux mouvements en question, de constater l'identité des forces en jeu : re-

marquons d'abord que cette constatation ne peut se faire *statiquement ;* les deux mouvements, en effet, ne sont pas simultanés ; or, la statique n'étudie que des forces qui se produisent à la fois, simultanément. Ainsi, on peut constater statiquement que deux poids sont égaux, à un *même instant,* qu'ils seront encore égaux entre eux à l'instant suivant, mais non pas que dans ce second instant ils sont respectivement égaux à ce qu'ils étaient dans le premier.

Il faut donc forcément, pour la comparaison des forces dans nos deux mouvements non simultanés, recourir à la dynamique : mais là encore nous sommes arrêté, car toute la dynamique est basée sur un certain nombre de lois fondamentales empruntées à l'observation ; or, la première de ces lois, celle de l'inertie ; « quand aucune force n'agit sur un point, le mouvement de ce « point est rectiligne et uniforme », suppose connue la mesure du temps sans laquelle on ne saurait pas ce que c'est qu'un mouvement uniforme.

Il suit de là qu'il n'est possible, d'aucune façon, de s'assurer que les deux mouvements en question se produisent dans des conditions identiques. La prétendue définition de la mesure du temps n'a donc aucune valeur et elle doit être rejetée.

9. A l'appui du raisonnement général que nous venons de faire, nous allons citer un exemple particulier : on veut démontrer que le mouvement de rotation de la terre par rapport aux étoiles est uniforme ; que fait-on ? On enregistre les angles successifs dont tourne une étoile ; on compare ensuite ces angles aux intervalles de temps fournis par un instrument servant à la mesure du temps ; or cet instrument est toujours un appareil qui reproduit une série de mouvements successifs supposés *identiques* entre eux : mais c'est précisément ce qui n'aurait pas lieu si la vitesse de rotation de la terre n'était pas constante ; il y a donc là un véritable cercle vicieux.

10. En résumé, dans l'état actuel de la science, le choix de l'angle de la rotation terrestre comme mesure du temps n'est pas justifié ; on peut donc se demander si ce choix est nécessaire et ce que deviendrait la mécanique s'il était différent. Dans cet ordre d'idées, la question se pose de la façon suivante : soit n le nombre

des grandeurs qui varient *simultanément* dans les mouvements que nous offre l'univers ; ces n grandeurs sont liées entre elles par $n-1$ équations (7) ; ces équations varient d'abord suivant les axes de coordonnées choisis comme repères ; de plus, si on suppose ces $n-1$ équations résolues par rapport à l'une des n grandeurs prise comme variable principale, la forme des équations change suivant qu'on adopte telle ou telle variable principale : existe-t-il un système d'axes et une variable pour lesquels ces équations présentent une forme plus particulièrement remarquable ? Si cela a lieu, nous serons en droit de choisir le système d'axes et la variable qui donnent lieu à cette particularité et ce choix sera ainsi justifié et défini à la fois. Nous allons donc étudier la mécanique à ce point de vue, c'est-à-dire sans choisir *à priori* ni les axes de coordonnées, ni la variable principale destinée à mesurer le temps et nous verrons si, dans le cours de cette étude, nous sommes amené à faire un choix particulier.

11. Le problème ainsi posé, on voit tout de suite que ses *données* sont empruntées à l'univers, et que sa *solution* sera fournie par la géométrie et l'analyse ; mais on peut aller plus loin.

Remplaçons l'univers matériel tel que nous l'observons par un système de points géométriques et substituons *au fait de la simultanéité une loi de correspondance géométrique* entre les positions diverses des points mobiles ; dès lors le problème, aussi bien dans ses *données* que dans *sa solution*, appartient aux mathématiques pures.

Cette observation a, au point de vue philosophique, une importance capitale, car elle nous fait prévoir, dès le début, une mécanique purement géométrique, indépendante de toutes données empruntées au monde matériel et par conséquent de l'existence même de ce monde matériel.

La mécanique ainsi comprise peut se définir comme il suit :

Des points se déplacent par rapport à un système d'axes de telle façon qu'ils prennent des positions déterminées pour chaque position de l'un d'entre eux, étudier les variations des diverses grandeurs qui se rattachent à ces déplacements.

Quant à la correspondance des points mobiles, elle peut résulter, soit de lois géométriques, soit d'équations auxquelles doivent

satisfaire les mouvements des points ; mais ces lois géométriques ou ces équations sont toujours supposées exister, car sans cela il n'y aurait que des mouvements indépendants les uns des autres et ce ne serait plus une question de mécanique : en un mot la mécanique consiste dans l'étude des mouvements entre lesquels il existe une dépendance.

12. Avant d'aborder la mécanique proprement dite, nous allons examiner une question qui, en réalité, appartient à la géométrie, mais qui se rattache à la mécanique par ses applications les plus importantes, nous voulons parler de la composition des segments de droite.

Ce problème est généralement traité à l'occasion des forces ; cette marche nous paraît présenter des inconvénients ; ainsi lorsqu'examinant des forces concourantes et leur résultante, on dit que le moment de la résultante est la somme des moments des composantes, on exprime un théorème qui est tout à fait indépendant de l'idée de force attribuée aux divers segments considérés ; ce théorème est vrai pour les segments considérés en eux-mêmes ; dès lors il n'est pas logique d'introduire dans la démonstration l'idée de force qui est inutile.

De plus, on a aussi à composer des vitesses, des accélérations, des quantités de mouvement, etc... ; il est donc préférable à tous égards d'étudier une fois pour toutes la composition des segments.

C'est ce que nous allons faire.

Bien entendu, dans tout ce qui suit, nous ne ferons qu'indiquer la suite des théorèmes sans insister sur des démonstrations que nous supposons connues des lecteurs.

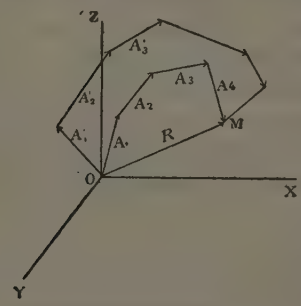
CHAPITRE II.

Composition des segments.

§ 1er. — *Résultante géométrique.*

13. Nous nous occuperons ici des segments de droite définis en grandeur, direction et sens comme AB ; A est le point initial, B le point terminal.

Soit dans l'espace un système de segments quelconque A_1, A_2, A_3, etc. ; transportons ces segments parallèlement à eux-mêmes et les uns au bout des autres à partir d'un point fixe quelconque O que nous supposerons être l'origine des axes rectangulaires OX, OY, OZ ; le point M, extrémité du dernier segment, est comme on sait indépendant de l'ordre dans lequel les segments se succèdent ; la droite OM ou R qui est toujours la même en grandeur, direction et sens, quel que soit le point O où on la forme, est la résultante de translation du système.



Quand les segments sont tous parallèles, le polygone de *composition* est une ligne droite ; R est parallèle à la direction des segments et égal à leur somme algébrique.

Les propriétés les plus importantes de la résultante de translation sont les suivantes :

Théorème. — La projection de la résultante sur un plan est la résultante des segments projetés sur ce même plan.

Théorème. — La projection de la résultante sur une droite est la somme algébrique des projections des segments sur cette droite.

Soient $X_1\ Y_1\ Z_1$ les projections du segment A_1 sur les axes, $R_x\ R_y\ R_z$ les projections de R ; on a d'après cela :

$$R_x = X_1 + X_2 + \cdots = \Sigma X_1 \quad R_y = \Sigma Y_1 \quad R_z = \Sigma Z_1.$$

Un segment unique est à lui-même sa résultante.

14. Pour que deux systèmes de segments $A_1\ A_2 \ldots$, et $A_1'\ A_2' \ldots$, aient même résultante de translation, il faut et il suffit évidemment qu'on ait :

$$\Sigma X_1 = \Sigma X_1' \quad \Sigma Y_1 = \Sigma Y_1' \quad \Sigma Z_1 = \Sigma Z_1'$$

$X_1'\ Y_1'\ Z_1'$ étant les projections de A_1' sur les axes.

Ces deux systèmes ont d'ailleurs même somme de projection sur une droite quelconque.

La considération des polygones de composition conduit immédiatement aux théorèmes suivants :

Théorème. — Si deux systèmes de segments ont même résultante de translation :

1° Ils ont encore même résultante quand on fait passer un segment d'un système dans l'autre en le changeant de sens ;

2° Ils ont encore même résultante quand on amplifie tous les segments dans un même rapport.

Ces propriétés résultent aussi des équations mêmes qui expriment que deux systèmes ont même résultante :

$$\begin{aligned} X_1 + X_2 + X_3 + \cdots &= X_1' + X_2' + X_3' + \cdots \\ Y_1 + Y_2 + Y_3 + \cdots &= Y_1' + Y_2' + Y_3' + \cdots \\ Z_1 + Z_2 + Z_3 + \cdots &= Z_1' + Z_2' + Z_3' + \cdots \end{aligned} \qquad (1)$$

15. Pour simplifier le langage et l'écriture, nous conviendrons d'exprimer la composition par les signes $\dot{+}$, $\dot{-}$ et $\dot{=}$ qui sont les signes $+$, $-$ et $=$, dans lesquels nous obliquons les traits horizontaux et nous écrirons d'une façon abrégée les équations (1) comme il suit :

$$A_1 \dot{+} A_2 \dot{+} A_3 \dot{+} \cdots \dot{=} A_1' \dot{+} A_2' \dot{+} A_3' \dot{+} \cdots \qquad (2)$$

Ainsi, l'équation (2) de composition est, par définition, identique aux trois équations (1).

R étant la résultante de translation, on a :

$$A_1 \dot{+} A_2 \dot{+} A_3 \dot{+} \cdots \dot{=} R$$

La relation $M \eqslantless N$ exprime que les deux segments M et N sont égaux, parallèles et de même sens ; de plus, s'ils ont même origine, ils coïncident.

A l'aide de cette notation nouvelle, les théorèmes précédents peuvent s'exprimer comme il suit :

Théorème. — Si l'on a :

$$A_1 + A_2 + A_3 + \cdots \eqslantless R \qquad (3)$$

on a, en projetant tous les segments sur un plan :

$$a_1 + a_2 + a_3 + \cdots \eqslantless r \qquad (4)$$

et en projetant sur une droite :

$$a_1' + a_2' + a_3' + \cdots = r' \qquad (5)$$

Réciproquement, si l'équation (5) est remplie pour trois axes de projection, on en déduit l'équation (3).

Dans une équation de la forme :

$$A_1 + A_2 + A_3 + \cdots \eqslantless A_1' + A_2' + A_3' + \cdots \qquad (6)$$

on peut multiplier les deux membres par un même nombre; on peut faire passer un terme d'un membre dans l'autre en le changeant de signe, ce qui donne par exemple :

$$A_1 + A_2 + A_3 + \cdots - A_1' \eqslantless A_2' + A_3' + \cdots \qquad (7)$$

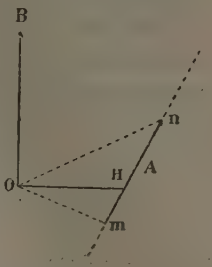
On démontrerait de même que si on avait $A \eqslantless A_1$, $B \eqslantless B_1$, $C \eqslantless C_1$, on aurait aussi $A + \lambda B + \mu C \eqslantless A_1 + \lambda B_1 + \mu C_1$. Ce théorème permet de combiner des systèmes ayant deux à deux même résultante, de façon à en obtenir deux autres ayant encore même résultante.

Cette notation nous sera d'une grande utilité dans toute la mécanique.

§ 2. — *Moment des segments.*

16. Nous appellerons moment d'un segment A par rapport à un point O un second *segment* OB perpendiculaire au plan mOn et égal au produit $A \times OH$, OH étant la distance du point O à A ; le sens de OB résulte du sens de A ; nous désignerons le moment

du segment A par la notation $\mu(A)$; le moment $\mu(A)$ est égal en grandeur au double de l'aire du triangle mOn.



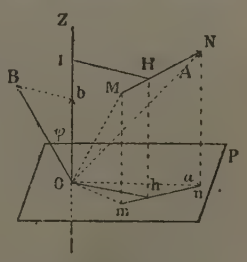
Nous tirons de cette définition les conséquences suivantes :

Théorème. — Le moment $\mu(A)$ est un segment perpendiculaire à A. Ce moment est nul, soit lorsque A est nul, soit lorsque le point O est sur la droite qui contient A.

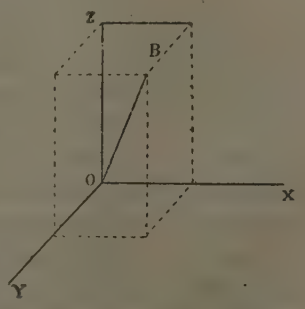
Il change de signe avec A : $\mu(-A) = -\mu(A)$.

Si l'on multiplie ou si l'on divise A par un nombre K, le moment est multiplié ou divisé par ce nombre; ainsi on a : $\mu(KA) = K\mu(A)$.

17. Soit un axe OZ ; menons le plan P perpendiculaire à cet axe au point O que nous supposons quelconque : projetons un segment MN égal à A sur ce plan en a; il est facile de voir : 1° que le moment Ob de a par rapport à O, moment dirigé suivant OZ, est toujours le même quel que soit le point O ; il est égal à $a \times III$, III étant la plus courte distance de A et de OZ ; 2° que ce moment Ob est la projection sur OZ du moment OB de A par rapport au point O : si l'on désigne par $\mu'(A)$ ce moment Ob, on a, φ étant l'angle BOZ : $\mu'(A) = \mu(A) \cos \varphi$.



$\mu'(A)$ dirigé suivant OZ à partir d'un point quelconque O, est le moment de A par rapport à OZ : ce moment est nul, soit quand A est parallèle à OZ, soit quand A rencontre OZ, ou enfin quand A est nul.

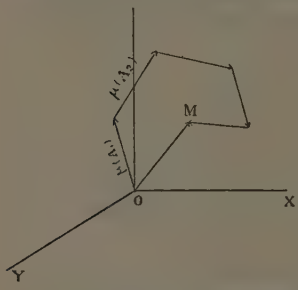


Soit OB égal au moment $\mu(A)$ par rapport à l'origine des coordonnées ; si $\mu_x(A)$, $\mu_y(A)$ et $\mu_z(A)$ sont les moments de A par rapport aux trois axes, $\mu_x(A)$, $\mu_y(A)$ et $\mu_z(A)$

sont, d'après ce qui précède, les projections du segment $\mu(A)$ sur ces trois axes : on en déduit ce théorème :

Théorème. — Pour que deux segments aient même moment par rapport au point O, il faut et il suffit qu'ils aient même moment par rapport aux trois axes OX, OY, OZ.

18. Soit OM le segment qu'on obtient en composant, à partir de l'origine O, les moments $\mu(A_1)$, $\mu(A_2)$, $\mu(A_3)$... des segments A_1, A_2, A_3... pris par rapport à ce point O. Ce segment OM est par définition le moment du système des segments par rapport à O ; nous le désignerons par la notation $\mu(A_1A_2A_3...)$ et nous aurons ainsi :



$$\mu(A_1A_2A_3...) = \mu(A_1) + \mu(A_2) + \mu(A_3) + \cdots \qquad (1)$$

Quand les segments sont tous dans un même plan contenant O, les moments $\mu(A_1)$, $\mu(A_2)$... sont tous dirigés suivant la normale en O à ce plan et par conséquent $\mu(A_1A_2...)$ est dirigé suivant cette même normale et égal à leur somme algébrique.

19. Le moment du système $A_1A_2...$ par rapport à une droite quelconque OX est la somme algébrique des moments des divers segments par rapport à OX, ce que nous traduisons par l'équation suivante :

$$\mu_x(A_1A_2..) = \mu_x(A_1) + \mu_x(A_2) + \cdots \qquad (2)$$

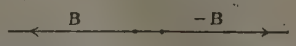
dans laquelle μ_x représente les moments pris par rapport à OX.

En comparant les équations (1) et (2), on voit tout de suite que $\mu_x(A_1)$, $\mu_x(A_2)$... sont respectivement les projections de $\mu(A_1)$, $\mu(A_2)$... (17), donc $\mu_x(A_1A_2...)$ est la projection sur OX de $\mu(A_1A_2...)$: de là ces deux théorèmes :

Théorème. — Le moment d'un système de segments par rapport à une droite OX est la projection sur cet axe du moment de ce système par rapport à un quelconque O de ses points.

Théorème. — Pour que deux systèmes de segments aient même moment en un point O, il faut et il suffit qu'ils aient même moment par rapport aux trois axes OX, OY, OZ.

20. Soit S un système de segments dont R est la résultante de translation et $\mu(S)$ le moment par rapport à un point O d'ailleurs quelconque : soit S_1 un autre système se déduisant de S par l'adjonction de deux segments B et — B placés sur une même droite, égaux et de signe contraire ; dans le polygone de composition qui donne la résultante de translation de S_1, ces deux segments s'annulent évidemment, de sorte que la résultante de S_1 sera R comme pour S.



De plus, $\mu(B)$ et $\mu(-B)$ s'annulent également dans la composition des moments ; on a donc aussi : $\mu(S_1) = \mu(S)$. S et S_1 ont par suite même résultante de translation et même moment en un point quelconque.

Deux systèmes, quels qu'ils soient, jouissant de cette propriété, sont dits *équivalents*.

Quand deux systèmes ont même moment en un point quelconque de l'espace, ils ont aussi même moment par rapport à une droite quelconque de l'espace et réciproquement : on peut donc dire que deux systèmes sont équivalents quand ils ont même résultante de translation et même moment par rapport à une droite quelconque.

Un système reste équivalent à lui-même quand on déplace un segment en lui conservant sa grandeur et son signe, sur la droite sur laquelle il est situé.

Nous allons maintenant chercher à ramener un système de segments au système le plus simple qui lui soit équivalent.

§ 3. — *Segments concourants et parallèles. Couples.*

21. Soit un système S de segments passant tous par le point I ; prenons la résultante de translation R que nous supposerons formée en I.

En suivant la même marche que dans la théorie des moments des forces, on arrive par des démonstrations bien connues aux deux théorèmes suivants :

Théorème. — Quand le système S consiste en segments situés tous dans un même plan, le moment $\mu(S)$ par rapport à un point

quelconque O de ce plan est égal au moment $\mu(R)$ de la résultante R par rapport à O : comme, de plus, $\mu(S)$ et $\mu(R)$ sont dirigés suivant la normale en O à ce plan, ils sont égaux en grandeur, direction et sens.

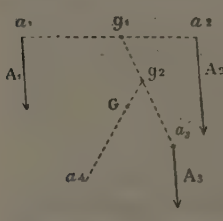
Théorème. — Dans un système quelconque S formé de segments concourants, on a pour une droite quelconque OX de l'espace : $\mu_x(S) = \mu_x(R)$, μ_x étant les moments par rapport à OX.

Donc, finalement, le système S de segments concourant en I et la résultante de translation R formée en I ont, d'une part, même résultante de translation, puisque R est à elle-même sa résultante, et, d'autre part, même moment pour une droite quelconque de l'espace ; par suite, S et R sont deux systèmes équivalents.

Pour cette raison, cette résultante de translation R *formée en* I s'appelle simplement la résultante de S. Il suit de là qu'un système reste équivalent à lui-même : 1° quand on remplace un certain nombre de segments concourants par leur résultante ; 2° quand on remplace un segment par des segments concourants dont le premier est la résultante.

22. Soient un système S de segments parallèles A_1, A_2, A_3... et a_1, a_2, a_3... les points initiaux de ces segments.

Prenons sur a_1a_2 le point g_1 tel qu'on ait $\frac{a_1g_1}{a_2g_1} = \frac{A_2}{A_1}$, puis sur g_1a_3 un point g_2 tel qu'on ait $\frac{g_1g_2}{a_3g_2} = \frac{A_3}{A_1 + A_2}$, et ainsi de suite jusqu'au dernier point initial ; nous arriverons à un point G qui, comme on sait, est indépendant de l'ordre dans lequel on prend successivement les points a_1, a_2... etc. ; G est le centre des segments parallèles ; il jouit des propriétés suivantes qui sont très connues :



Théorème. — Le centre G de segments parallèles reste le même : 1° quand on change la direction des segments, ces segments restant d'ailleurs parallèles ; 2° quand on modifie tous les segments proportionnellement à eux-mêmes.

Théorème. — Quand on projette sur un plan un système de segments parallèles de centre G, on obtient en projection un

second système de segments parallèles dont le centre est la projection de G.

De même, quand on projette des segments parallèles sur une droite, le centre G se projette suivant le centre des segments projetés.

23. La résultante de translation de segments parallèles est la somme algébrique de ces segments et leur est parallèle.

Considérons en particulier la résultante R formée au centre G de ces segments : en raisonnant sur ces segments parallèles comme on raisonne en mécanique sur les forces parallèles, on établit les deux théorèmes suivants :

Théorème. — Quand les segments A_1, A_2... sont situés dans un même plan P, R est situé aussi dans ce plan et l'on a, en prenant les moments par rapport à un point quelconque du plan :

$$\mu.(R) = \mu.(A_1 A_2 A_3 \ldots).$$

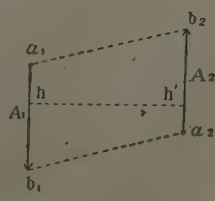
Théorème. — Les segments parallèles étant quelconques, on a, en prenant les moments par rapport à une droite quelconque de l'espace OX : $\mu_x(R) = \mu_x(A_1 A_2 \ldots)$.

Donc finalement le système S des segments A_1, A_2... et le système formé par R ont même résultante de translation et même moment par rapport à une droite quelconque, donc S et R sont équivalents.

Cette résultante de translation R qui passe par le centre des segments parallèles s'appelle simplement la résultante.

Bien entendu, les segments parallèles dont nous venons de parler ne sont pas nécessairement de même sens.

24. Quand deux segments parallèles A_1 et A_2 sont égaux et de sens contraire, ils forment ce qu'on appelle un couple ; on voit tout de suite que le centre de deux segments parallèles formant couple est rejeté à l'infini : la résultante de translation d'un couple est évidemment nulle ; il en résulte cette conséquence très importante que, pour établir l'équivalence de deux couples ou de deux systèmes de couples, il suffit de prouver qu'ils ont même moment par rapport à un point quel-



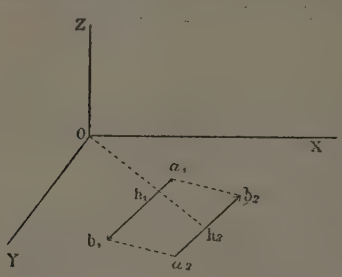
conque, la condition d'égalité des résultantes étant toujours remplie, puisque ces résultantes sont nulles.

Le sens d'un couple A_1A_2 dépend du sens des segments A_1 et A_2 ; l'aire du couple est l'aire du parallélogramme $a_1b_1a_2b_2$, aire qui reste constante quand on fait glisser les segments suivant leur direction ; cette aire est égale à $hh' \times A_1$.

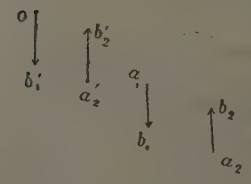
Lorsqu'on projette un couple C d'aire σ sur un plan formant avec le plan de C un angle φ, on obtient un second couple C' d'aire σ' et l'on a : $\sigma' = \sigma \cos \varphi$.

25. Soient deux couples C_1 et C_2 de même aire σ et de même sens situés dans des plans parallèles.

Cherchons les moments de ces couples par rapport à une droite quelconque OZ ; prenons trois axes de coordonnées rectangulaires



OX, OY, OZ ; si a_1b_1, a_2b_2 est la projection du couple C_1 sur le plan XY, nous aurons le moment $\mu_z(C_1)$ en ajoutant les moments de a_1b_1 et a_2b_2 pris par rapport à O ; ces moments sont respectivement $a_1b_1 \times Oh_1$ et $a_2b_2 \times Oh_2$, et comme ils sont de sens contraire, leur somme algébrique est $a_1b_1 \times h_1h_2$, c'est-à-dire l'aire du parallélogramme $a_1b_1a_2b_2$; or, si φ est l'angle que fait le plan de C_1 avec le plan des XY, l'aire $a_1b_1a_2b_2$ est égale à $\sigma \cos \varphi$. Mais pour le couple C_2, l'aire σ est la même, φ est aussi le même, puisque les couples C_1 et C_2 sont dans des plans parallèles ; donc les deux couples C_1, C_2 ont même moment $\sigma \cos \varphi$ par rapport à la droite OZ qui est quelconque ; de là ce théorème :



Théorème. — Deux couples situés dans des plans parallèles, de même aire et de même sens, sont équivalents.

26. Cherchons le moment d'un couple C par rapport au point O : à cet effet, transportons C parallèlement à lui-même de façon que le point a_1 vienne en O ; la nouvelle position C' du couple est, d'après le théo-

rème précédent, équivalente à la position primitive C; or le moment de C′ par rapport à O se réduit au moment du segment $a_2'b_2'$, puisque l'autre segment passe par O.

Par suite, le moment de C′ ou de C est perpendiculaire au plan $Oa_2'b_2'$, c'est-à-dire au plan de C et égal au double de l'aire du triangle $Oa_2'b_2'$, c'est-à-dire à l'aire du couple C; d'où ce théorème :

Théorème. — Le moment d'un couple C pour un point quelconque de l'espace est constant; il est égal à l'aire du couple et dirigé suivant la normale au plan de ce couple.

Ce moment étant indépendant du point où on le forme s'appelle simplement le moment du couple.

27. Soit un système formé de segments qui constituent deux à deux des couples C_1, C_2, C_3.....; le moment du système en un point O est évidemment la résultante $\mu(C_1) + \mu(C_2) + \mu(C_3) + \ldots$ des moments des couples par rapport à ce point: or, d'après le théorème précédent, les divers côtés $\mu(C_1)$, $\mu(C_2)$... du polygone de composition des moments sont fixes en grandeur, direction et sens, quel que soit le point O; il en est donc de même de leur résultante, c'est-à-dire du moment du système $\mu(C_1C_2C_3\ldots)$.

Cela posé, prenons dans un plan P perpendiculaire au moment $\mu(C_1C_2\ldots)$ un couple C′ de sens convenable et dont l'aire soit précisément la valeur de ce moment; le couple C′ et le système $C_1C_2\ldots$ ont évidemment même moment pour un point quelconque de l'espace et par suite sont équivalents.

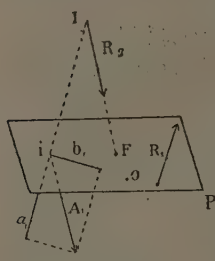
Théorème. — Donc : un système de couples peut toujours se ramener à un couple unique qui lui soit équivalent.

§ 4. — *Réduction d'un système de segments.*

28. Revenons maintenant au problème que nous avions en vue, savoir la réduction d'un système quelconque au système équivalent le plus simple: nous indiquerons succinctement les deux méthodes connues.

Coupons les segments A_1, A_2, A_3... par un plan P qui les rencontre tous et ramenons leurs points initiaux dans ce plan; prenons en dehors du plan un point I quelconque.

On peut dans le plan IA_1 décomposer A_1 en deux segments, l'un a_1 suivant Ii et l'autre b_1 situé dans le plan P ; A_1 sera alors remplacé par ses deux composantes a_1 et b_1 qui lui sont équivalentes.



En procédant de même pour tous les autres segments, on a finalement : 1° les composantes comme b_1 toutes situées dans le plan et qui, par conséquent, composées de proche en proche, se ramènent en général à une résultante unique R_1 située dans ce même plan ; 2° les composantes comme a_1 qui passent toutes en I et qui par conséquent ont une résultante unique R_2.

Finalement, le système est ramené ainsi à un système équivalent de deux segments R_1 et R_2 ; comme, d'ailleurs, le plan P et le point I sont indéterminés, on a le théorème suivant :

Théorème. — Tout système peut en général être ramené à deux segments et cela d'une infinité de façons.

29. Le moment du système en un point O quelconque est $\mu(R_1) + \mu(R_2)$; supposons que le point O soit situé dans le plan P, $\mu(R_1)$ est alors perpendiculaire à P, dès lors le moment $\mu(R_1) + \mu(R_2)$ ne peut être perpendiculaire à P que si $\mu(R_2)$ est nul, ce qui n'a lieu que pour le point F où R_2 rencontre P ; donc :

Théorème. — Il y a dans le plan P un point et un seul pour lequel le moment du système est perpendiculaire à ce plan.

Ce point remarquable s'appelle le foyer du plan.

Ce point étant unique, on en déduit immédiatement cet autre théorème :

Théorème. — Si dans la réduction d'un système à deux segments, on laisse le plan P fixe en faisant varier le point I, la résultante R_2 qui passe par I passe toujours par le foyer F du plan P.

30. Le second moyen de réduire un système résulte de la théorie des couples : prenons un point O quelconque dans l'espace ; en ce point menons deux segments A_1' et $-A_1'$ égaux et parallèles au segment A_1 du système ; le système reste ainsi équivalent à lui-même : procédons de même pour tous les autres segments ; nous avons finalement : 1° les segments comme A'_1 qui

sont les segments mêmes du système transportés parallèlement en O et qui ont une résultante unique R, laquelle n'est autre que la résultante de translation du système ; 2° les couples comme $-A_1'A_1$ qui peuvent être remplacés par un couple unique C. Donc :

Théorème. — Tout système peut se ramener à une résultante R et à un couple C, cela d'une infinité de façons, puisque le point O où l'on fait la réduction est arbitraire.

Dans ce procédé de réduction, la résultante R est toujours la résultante de translation du système : le couple C pouvant être déplacé dans son plan, ainsi que nous l'avons vu, supposons que l'un de ses deux segments rencontre R, on pourra alors remplacer R et ce segment par leur résultante et l'on retrouvera ainsi le système de deux segments équivalent au système primitif.

Le moment du système en O est évidemment le moment du couple C, car le moment de la résultante R qui passe par O est nul.

En un autre point O′ quelconque, le moment du système est $\mu(C) + \mu(R)$, expression dans laquelle $\mu(C)$ est constante.

On déduit de là le théorème suivant :

Théorème. — Deux systèmes de segments sont équivalents quand ils ont même résultante de translation et, pour un point seulement, même moment.

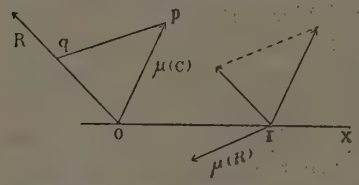
31. Nous allons encore démontrer le théorème suivant :

Théorème. — Deux systèmes S et S′ sont équivalents quand ils ont même moment en trois points O_1, O_2 et O_3 non en ligne droite.

Les deux systèmes ayant même moment en O_1 peuvent être ramenés, en ce point à leurs résultantes de translation R et R′ et à un même couple C : supposons que R et R′ soient différents, on pourra toujours poser $R' = R + \rho$, ρ étant un segment passant par O_1 ; les moments des deux systèmes en O_2 seront alors $\mu(C) + \mu(R)$ et $\mu(C) + \mu(R')$; ce dernier équivaut à $\mu(C) + \mu(R) + \mu(\rho)$; on a donc $\mu(C) + \mu(R) = \mu(C) + \mu(R) + \mu(\rho)$, c'est-à-dire $\mu(\rho) = 0$; on verrait de même que le moment de ρ en O_3 est nul ; $\mu(\rho)$ étant nul pour les deux points O_2, O_3, il faut nécessairement que ρ soit nul, car ρ passant par O_1 ne peut passer à la fois par O_2 et O_3,

puisque les points O_1, O_2 et O_3 ne sont pas en ligne droite; ρ étant nul, on a $R \not\equiv R'$; dès lors les deux systèmes ont même résultante de translation et même moment en O_1; par suite, ils sont équivalents.

32. Soit un système ramené au point O à sa résultante de translation R et au couple C; le moment du système au point I est $\mu(C) + \mu(R)$; cherchons la condition pour que ce segment

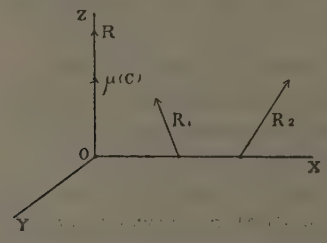


$\mu(C) + \mu(R)$ soit parallèle à R : menons OX perpendiculaire en O au plan P qui contient R et $\mu(C)$: $\mu(R)$ est perpendiculaire au plan ROI et parallèle au plan P; si donc on abaisse du point p extrémité du segment $\mu(C)$ la perpendiculaire pq sur R, $\mu(R)$ est précisément parallèle à pq; on voit aisément que si le point I est choisi de telle façon qu'on ait $\mu(C)$, c'est-à-dire $R \times OI$, $= pq$, la résultante en I de $\mu(C)$ et de $\mu(R)$ est parallèle à R. Ce point I est d'ailleurs unique. Donc :

Théorème. — Il existe sur OX un point et un seul pour lequel le moment est dirigé suivant la résultante de translation. La droite sur laquelle est situé ce moment est unique dans le système et s'appelle l'axe central.

On démontre sans difficulté qu'en faisant tourner un système autour de cet axe ou en le faisant glisser suivant cet axe, ce système reste équivalent à lui-même.

33. Soit un système ramené à deux segments R_1 et R_2, ce qui, comme nous le savons, peut se faire d'une infinité de façons : prenons l'axe central OZ du système et traçons la perpendiculaire X commune à R_1 et R_2; soit R la résultante de translation et C le couple dont le moment est dirigé suivant l'axe central OR; les systèmes R_1, R_2 et R, C sont ainsi équivalents au système primitif et par conséquent entre eux. Prenons les moments par rapport à X; R_1 et R_2 rencontrant X, on a $\mu_x(R_1R_2) = 0$; on a



donc aussi $\mu_x(C, R) = 0$; mais R est la résultante de translation de R_1 et R_2 ; il en résulte que R_1, R_2 et R sont parallèles à un même plan auquel X est nécessairement perpendiculaire ; dès lors X est aussi perpendiculaire à R et par suite à $\mu(C)$; $\mu(C)$ étant perpendiculaire à X, $\mu_x(C)$ qui est la projection de $\mu(C)$ sur X est nul et l'on a $\mu_x(R, C) = \mu_x(R) = 0$; or R n'est ni nul ni parallèle à X, donc R rencontre X. De là ce théorème :

Théorème. — La perpendiculaire commune aux deux segments R_1 et R_2 rencontre l'axe central en un point O et lui est perpendiculaire.

§ 5. — *Figures corrélatives.*

34. — Nous rencontrons ici un cas des figures corrélatives que nous ne ferons qu'indiquer, parce qu'il ne se rattache pas directement à notre sujet.

Un système de segments étant donné, soient L_1 et L_2 deux droites sur lesquelles sont situés deux segments R_1 et R_2 qui forment un système équivalent au précédent.

On appelle L_1 et L_2 deux droites conjuguées ; les propriétés principales de ces droites sont les suivantes, nous nous bornerons à les énoncer :

Théorème. — Lorsque la droite L_1 se déplace dans un plan P, sa conjuguée L_2 passe par un point fixe F qui est le foyer du plan P.

Théorème. — Lorsqu'un plan P se déplace en passant par une droite fixe L_1, son foyer F décrit la droite L_2 conjuguée à L_1.

Théorème. — Lorsqu'un plan P se déplace en passant par un point fixe I, son foyer F décrit un plan Q qui a le point I pour foyer.

Théorème. — Lorsque quatre plans passent par une droite L_1, le rapport anharmonique de ces quatre plans est égal au rapport anharmonique de leurs foyers situés sur la droite L_2 conjuguée à L_1.

Ainsi que nous l'avons dit, il s'agit là d'un cas particulier des figures corrélatives ; ce qui le distingue du cas général, c'est que le point qui correspond à un plan est situé dans ce plan, puisqu'il en est le foyer.

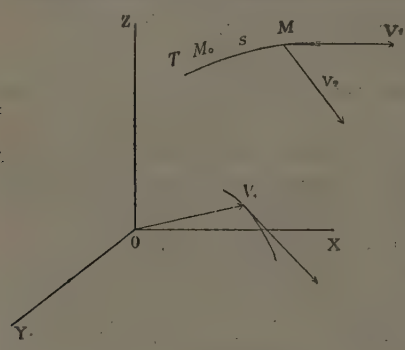
CHAPITRE III.

Cinématique.

§ 1er. — *Vitesses successives.*

35. — Nous avons dit que dans toute question de mouvement il fallait d'abord choisir les axes pris comme repères ; si l'on prenait un autre système d'axes *immobiles* par rapport aux premiers, ce second système ne devrait pas être considéré comme formant de nouveaux repères, puisqu'il ne modifierait en rien les trajectoires du mouvement. Il ne faut donc pas oublier qu'un changement de repères consiste toujours dans le choix d'un second système d'axes *en mouvement* par rapport au premier.

Cela posé, soit T la trajectoire d'un mobile M par rapport aux axes OX, OY, OZ : d'après la définition même de la mécanique (11), toutes les grandeurs qui se rattachent au mouvement de M dépendent d'une seule grandeur t que nous appelons la variable principale; la longueur s de l'arc parcouru M_0M est donc liée à t par une équation de la forme :



$$s = f(t). \qquad (1)$$

C'est ce qu'on appelle l'équation du mouvement du point sur sa trajectoire par rapport à t.

Sur la tangente en M à la trajectoire, portons dans le sens du mouvement à partir du point M une longueur v_1 égale à $\frac{ds}{dt}$, ce *segment* v_1 est la première vitesse du point M par rapport à t.

36. On a souvent à étudier en mécanique des segments comme v_1, variables et mobiles ; il est commode de transporter ces segments parallèlement à eux-mêmes en un point fixe, par exemple à l'origine des coordonnées.

De cette façon, le point initial devient fixe, et l'autre extrémité du segment décrit une courbe à laquelle nous donnerons le nom général d'*indicatrice*.

Cela posé, transportons la vitesse v_1 en O et soit T_1 la trajectoire que décrit son extrémité libre V_1 ; nous disons trajectoire parce que V_1 prend une position différente pour chaque valeur de t ; soit v_2 la première vitesse de ce point V_1 transportée en M, v_2 est la seconde vitesse ou l'accélération de M par rapport à t.

De même, si l'on prend l'indicatrice que décrit l'extrémité libre de v_2 transporté en O, la première vitesse de cette extrémité nous donnera en grandeur et en direction la seconde vitesse de V_1 et la troisième vitesse v_3 de M.

C'est ainsi que l'on définit les vitesses des différents ordres du point M par rapport à t : quand il s'agira de la première vitesse, nous dirons simplement la vitesse du point.

37. Supposons que nous remplacions la variable principale par une autre t', ces deux variables étant liées par la relation $t = \varphi(t')$, la première vitesse par rapport à t' conservera sa direction, celle de la tangente à la trajectoire, mais sa valeur deviendra $\frac{ds}{dt'} = \frac{ds}{dt} \cdot \frac{dt}{dt'}$; la première vitesse changeant de valeur, donnera une indicatrice différente ; en d'autres termes, V_1 décrira une autre courbe, de sorte que la seconde vitesse v_2 changera en général *de grandeur et de direction* ; il en sera de même des vitesses suivantes. Donc en général :

Théorème. — Quand on change de variable principale, la première vitesse change de valeur et les vitesses d'ordre supérieur de valeur et de direction à la fois.

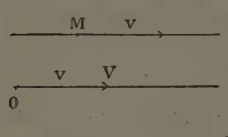
Nous verrrons plus loin toute l'importance de cette proposition.

Nous avons à peine besoin d'ajouter que l'équation du mouvement $s = f(t)$ prend une autre forme quand on remplace t par t'.

Enfin, remarquons que dans un certain cas le changement de va-

riable est sans influence sur les vitesses, c'est lorsqu'on a $t = kt'$, car alors la première vitesse devient $\frac{ds}{dt'} = k\frac{ds}{dt}$; dans ce cas, toutes les vitesses sont modifiées proportionnellement et elles gardent leur direction : pour cette raison, nous ne regarderons pas comme différentes deux variables t et t' proportionnelles.

38. Dans le mouvement rectiligne, la vitesse est dirigée constamment suivant la droite que décrit le mobile ; il en résulte que les indicatrices successives sont toutes des droites de même direction que la trajectoire ; les vitesses de différents ordres sont donc aussi dirigées suivant cette trajectoire. Si v est la vitesse du point M dans ce mouvement rectiligne, on a $v = \frac{ds}{dt}$; formons en O l'indicatrice de v, laquelle sera une droite parallèle à la première, la seconde vitesse de M sera la vitesse du point V, extrémité de la vitesse v transportée en O; or, la vitesse de V est $\frac{dv}{dt}$, c'est-à-dire $\frac{d^2s}{dt^2}$; ce raisonnement s'applique aux vitesses successives; donc :



Théorème. — Dans un mouvement rectiligne, les vitesses, toutes dirigées suivant la trajectoire, ont pour valeurs les dérivées $\frac{ds}{dt}$, $\frac{d^2s}{dt^2}$, $\frac{d^3s}{dt^3}$.....

Quand le mouvement est plan, toutes les vitesses sont situées dans ce plan.

Quand la trajectoire est une ligne à double courbure, la première vitesse transportée en O décrit un cône dont les plans tangents sont parallèles aux plans osculateurs de la trajectoire ; il en résulte que l'accélération est toujours dirigée dans le plan osculateur de la trajectoire.

39. Quand l'équation du mouvement est du premier degré en t, $s = a + bt$, le mouvement est dit uniforme par rapport à t ; la vitesse $\frac{ds}{dt} = b$ est constante.

Réciproquement, quand la vitesse est constante, l'équation du mouvement est du premier degré en t.

Dans ce mouvement, les arcs décrits sont proportionnels aux variations correspondantes de t.

40. Projetons la trajectoire d'un point M sur un plan, le plan des XY, par exemple ; soient ds l'élément de trajectoire correspondant à la variation dt de la variable et ds' la projection de ds ; la vitesse v de M a la direction de ds et la vitesse v' de sa projection M′ est dirigée suivant ds' ; comme d'ailleurs $\frac{ds'}{dt}$ a évidemment une longueur égale à la projection de $\frac{ds}{dt}$, il en résulte que $\frac{ds'}{dt}$ est en grandeur et en direction la projection de $\frac{ds}{dt}$; le même raisonnement s'appliquerait si l'on projetait le mouvement sur une droite.

Remarquons maintenant que les propriétés des indicatrices des vitesses se conservent évidemment en projection ; ainsi les indicatrices de la trajectoire de l'espace se projettent suivant les indicatrices de la trajectoire projetée ; il en résulte immédiatement que :

Théorème. — Dans le mouvement projeté, les vitesses d'ordre quelconque sont respectivement les projections des vitesses du point dans l'espace.

Ce théorème est vrai, qu'on projette sur un plan ou sur une droite.

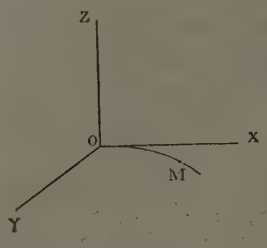
41. On peut exprimer les positions successives d'un mobile en fonction de la variable t au moyen des trois équations suivantes : $x = f_1(t)$, $y = f_2(t)$, $z = f_3(t)$; x, y et z étant les coordonnées du mobile.

Or $x = f_1(t)$ est l'équation du mouvement du mobile projeté sur l'axe OX ; ce mouvement projeté étant rectiligne, ses vitesses sont (38) $\frac{dx}{dt}, \frac{d^2x}{dt^2}, \frac{d^3x}{dt^3}$.

On a de même la vitesse du mobile projeté sur les deux autres axes.

En résumé, la vitesse V_n d'ordre n pour une position M du mobile, a pour projection sur les trois axes les dérivées $\frac{d^nx}{dt^n}, \frac{d^ny}{dt^n}$ et $\frac{d^nz}{dt^n}$; donc V_n est la résultante de translation formée en M de ces trois dérivées dirigées suivant les axes.

Supposons, en particulier, que l'origine des coordonnées soit un point O de la trajectoire; prenons, de plus, la tangente en O comme axe des X et le plan osculateur comme plan des XY, OY étant ainsi la normale principale; cherchons l'accélération j du mobile en O : cette accélération est la résultante des trois accélérations $\frac{d^2x}{dt^2}$, $\frac{d^2y}{dt^2}$ et $\frac{d^2z}{dt^2}$; mais l'accélération j est située dans le plan osculateur, c'est-à-dire le plan des XY (38), donc $\frac{d^2z}{dt^2}$ est nul en O.



Soient s l'arc infiniment petit OM correspondant à la variation infiniment petite θ de la variable t et x, y, z les coordonnées du point M; on sait que $s - x$ est du troisième ordre, c'est-à-dire qu'on a $x = s + As^3 + \cdots$; on en déduit $\frac{dx}{dt} = \frac{ds}{dt} + 3As^2\frac{ds}{dt} + \cdots$ et $\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2s}{dt^2} + 6As[\cdots]$, de sorte que, pour le point O, c'est-à-dire pour $s = 0$, on a $\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_0 = \left(\frac{d^2s}{dt^2}\right)_0$.

Ainsi, au point O, l'accélération $\frac{d^2x}{dt^2}$, qu'on appelle l'accélération *tangentielle* du mobile, est égale à $\frac{ds^2}{dt^2}$.

Pour calculer $\frac{d^2y}{dt^2}$, partons de la formule :

$y = \left(\frac{dy}{ds}\right)_0 s + \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)_0 \frac{s^2}{1.2} + \cdots$ dans laquelle $\left(\frac{dy}{ds}\right)_0$ est nul, puisque OX est tangent à la trajectoire; on déduit de là : $\frac{dy}{dt} = \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)_0 s\frac{ds}{dt} + s^2[\cdots]$ et $\frac{d^2y}{dt^2} = \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)_0\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 + s[\cdots]$, ce qui, pour $s = 0$, donne $\frac{d^2y}{dt^2} = \left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)_0\left(\frac{ds}{dt}\right)^2$. Or $\frac{ds}{dt}$ est la vitesse v du mobile en O et $\left(\frac{d^2y}{ds^2}\right)_0$ l'inverse du rayon de courbe ρ en O; on a donc finalement $\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{v^2}{\rho}$.

C'est ce qu'on appelle l'accélération normale.

D'après cela, l'accélération du mobile en O est la diagonale d'un rectangle construit sur OX et OY et ayant pour côtés $\frac{d^2s}{dt^2}$ et $\frac{v^2}{\rho}$.

42. Supposons que le mouvement d'un mobile, au lieu d'être défini par les équations :

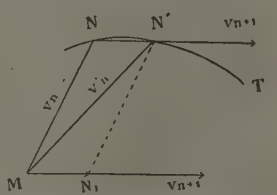
$x = f_1(t)$, $y = f_2(t)$ et $z = f_3(t)$, soit défini par les équations différentielles :

$$\frac{d^n x}{dt_n} = \varphi_1(t) \qquad \frac{d^n y}{dt_n} = \varphi_2(t) \qquad \text{et } \frac{d^n z}{dt_n} = \varphi_3(t) \qquad (1)$$

En intégrant n fois l'une de ces équations (1), par exemple $\frac{d^n x}{dt_n} = \varphi_1(t)$, on arrivera à une équation $x = A_1(t)$ qui contiendra n constantes arbitraires; mais si l'on se donne pour une valeur particulière t_0 de t les valeurs $x_0 \left(\frac{dx}{dt}\right)_0 \left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)_0 \cdots \left(\frac{d^{n-1}x}{dt_{n-1}}\right)_0$, ces n constantes se trouvent déterminées et par suite aussi l'équation $x = A_1(t)$; les deux autres équations (1) donneraient de même $y = A_2(t)$ et $z = A_3(t)$: on a ainsi pour le mobile une trajectoire unique; c'est ce que nous exprimerons en disant que :

Théorème. — La trajectoire d'un mobile et son mouvement sur cette trajectoire sont bien déterminés lorsqu'on se donne la loi de variation de sa vitesse d'ordre n (c'est-à-dire les 3 équations [1]) et, pour une valeur particulière de t, sa position ainsi que ses $(n-1)$ premières vitesses.

43. Soient, pour une position M d'un mobile, v_n et v_{n+1} ses vitesses d'ordre n et $n+1$; formons en M l'indicatrice NT de cette vitesse v_n; pendant une variation infiniment petite dt de la variable t le point N décrit sur cette indicatrice l'arc NN′ et MN′ est alors la vitesse v_n' transportée en M pour la position nouvelle qu'occuperait le mobile après cette variation dt : par définition v_{n+1} est en grandeur et direction la première vitesse du point N, c'est-à-dire qu'on a $v_{n+1} = \frac{NN'}{dt}$ ou $NN' = v_{n+1}dt$.



Portons NN′ en MN_1 sur v_{n+1} ; on voit alors que v_n' est la résultante de v_n et de MN_1 ou $v_{n+1}\,dl$, $v_{n+1}\,dt$ ayant, bien entendu, la direction de v_{n+1}.

On a donc :

$$v_n' = v_n + v_{n+1}dt. \qquad (1)$$

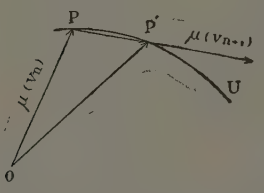
Prenons les moments par rapport à un point quelconque, l'origine des coordonnées, par exemple ; il vient :

$$\mu(v_n') = \mu(v_n) + \mu(v_{n+1}dt).$$

Mais on a (16) : $\mu(v_{n+1}dt) = dt\mu(v_{n+1})$

on en déduit : $\mu(v_n') = \mu(v_n) + dt\mu(v_{n+1}). \qquad (2)$

Cette équation (2) est susceptible d'une interprétation géométrique très simple ; formons au point O l'indicatrice u que décrit le point P extrémité du segment $\mu(v_n)$; après la variation dt, le point P sera venu en P′ et OP′ est le segment $\mu(v_n')$; or, dans le triangle POP′ on a OP′ = OP + PP′ ou $\mu(v_n') = \mu(v_n) + PP'$; en comparant cette équation à l'équation (2), on en déduit $PP' = dt\mu(v_{n+1})$ ou $\frac{PP'}{dt} = \mu(v_{n+1})$; or $\frac{PP'}{dt}$ est la vitesse du point P sur l'indicatrice u. De là ce théorème :



Théorème. — Si u est l'indicatrice que décrit l'extrémité P du moment $\mu(v_n)$, $\mu(v_{n+1})$ est à chaque instant la vitesse de ce point P.

Les équations (1) et (2) sont d'une application continuelle en mécanique.

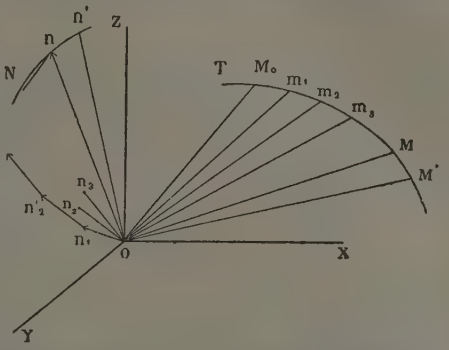
Il convient de remarquer que les indicatrices des vitesses sont toujours identiques à elles-mêmes, quel que soit le point où on les forme ; il n'en est pas de même des indicatrices des moments de ces vitesses, puisque ces moments varient d'un point à l'autre.

Lorsqu'il s'agit d'un mouvement s'exécutant dans un plan P et que le point O est dans ce plan, les moments des vitesses, lesquelles sont toujours situées dans ce plan, sont toujours dirigés suivant la normale OZ à ce plan ; dans ce cas, l'équation (2) devient

$$\mu(v_n') = \mu(v_n) + dt\mu(v_{n+1}) \qquad (3)$$

puisque les moments s'ajoutent au lieu de se composer : toutes les indicatrices comme u se confondent alors avec la normale OZ.

44. Soit M_0 la position initiale du mobile M sur sa trajectoire T, prenons les arcs M_0m_1, m_1m_2, m_2m_3..., qui correspondent à une variation très petite dt de la variable t, et menons les rayons vecteurs OM_0, Om_1, Om_2, etc. ; nous représenterons, suivant l'usage, les aires triangulaires OM_0m_1, Om_1m_2, etc., par des segments On_1, On_2, On_3... normaux aux plans de ces triangles et proportionnels à leurs surfaces. Composons tous ces segments, leur résultante On est déterminée de grandeur et de direction pour chaque position du rayon vecteur mobile OM : On est ce que nous appellerons l'axe des aires de l'arc M_0M par rapport au point O : cet axe jouit de la propriété suivante que nous nous bornerons à énoncer :



Théorème. — L'aire M_0OM projetée sur un plan, celui des XY par exemple, est représentée par la projection de l'axe On sur la normale OZ à ce plan.

Il en résulte en particulier que l'aire projetée est maxima quand le plan de projection est perpendiculaire à On.

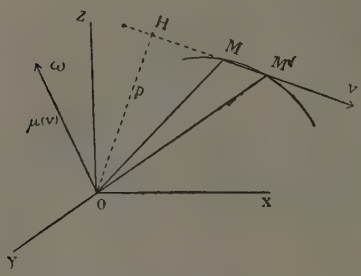
Soit N l'indicatrice que décrit le point n : les segments On_1, n_1n_2, n_2n_3... étant infiniment petits peuvent être considérés comme des éléments de cette indicatrice ; donc chacun de ces éléments divisés par dt donne en grandeur et direction la vitesse sur l'indicatrice.

Désignons par $d\sigma$ l'aire infiniment petite MOM', aire représentée en grandeur et direction par l'élément nn', la vitesse du point n sur N est dirigée suivant nn', c'est-à-dire suivant la normale au plan MOM' et elle est égale à $\frac{nn'}{dt}$ ou $\frac{d\sigma}{dt}$; cette vitesse $\frac{d\sigma}{dt}$ transportée en O et normale au plan MOM', est la vitesse aréolaire du point M. On a donc ce théorème :

Théorème. — La vitesse aréolaire du mobile M par rapport au point O est la vitesse du point n, extrémité de l'axe des aires.

Dans le cas où la courbe T est plane et le point O situé dans son plan, l'indicatrice N est évidemment la normale en O à ce plan.

45. Soit ω la vitesse aréolaire $\frac{d\sigma}{dt}$ du point M : nous avons dit



que cette vitesse était normale au plan du triangle MOM', c'est-à-dire au plan de OM et de la vitesse v en M : prenons le moment de v par rapport à ce point O, ce moment $\mu(v)$ est aussi perpendiculaire à ce même plan : donc ω et $\mu(v)$ sont dirigés suivant la même droite.

De plus, si p est la distance OH du point O au segment v, on a $\mu(v) = p \,.\, v = p \,.\, \frac{ds}{dt}$; or $\frac{1}{2} p \,.\, ds$ est l'aire $d\sigma$ du triangle MOM', donc $\mu(v)$ est égal à $2\,\frac{d\sigma}{dt}$ ou $2\,\omega$. Donc finalement :

Théorème. — La vitesse aréolaire ω est égale en grandeur, direction et signe au demi-moment de la vitesse v, les aires et les moments étant pris par rapport au même point O.

L'indicatrice que décrit l'extrémité du segment ω est donc la même que pour $\frac{1}{2}\mu(v)$.

En appliquant le théorème des moments des vitesses (43) pour la première vitesse v et la seconde j, nous avons :

$$\mu(v') = \mu(v) + dt\mu(j).$$

Or $\frac{1}{2}\mu(v')$ et $\frac{1}{2}\mu(v)$ sont respectivement les vitesses aréolaires ω' et ω; on a donc :

$$\omega' = \omega + \frac{1}{2} dt\mu(j).$$

Il en résulte que $\frac{1}{2}\mu(j)$ est en grandeur et direction la vitesse de l'extrémité du segment ω sur l'indicatrice que décrit cette extrémité.

46. Dans le cas où le mouvement est plan et le point O situé dans ce plan, ω est toujours normal à ce plan au point O, et cette normale est l'indicatrice de son extrémité ; on a alors :

$$\omega' = \omega + \frac{1}{2} dt\mu(j).$$

Supposons que dans ce mouvement plan l'accélération j passe toujours par un point fixe que nous prendrons pour l'origine O : dans ce cas, le moment de j par rapport à O reste toujours nul, et l'on a pendant tout le mouvement $\mu(j) = 0$ et $\omega = k$, k étant une constante ; l'équation ω ou $\frac{d\sigma}{dt} = k$ nous donne $\sigma = kt$. De là ce théorème connu sous le nom de théorème des aires :

Théorème. — Lorsque dans un mouvement plan l'accélération passe par un point fixe O, l'aire décrite par le rayon vecteur qui joint ce point O au mobile est proportionnelle à la variation correspondante de t.

La réciproque est vraie ; ainsi, si l'on a $\sigma = kt$, on en déduit $\frac{d\sigma}{dt}$ ou $\omega = k$; ω étant constant, dans la formule $\omega' = \omega + \frac{1}{2} dt\mu(j)$, $\mu(j)$ est constamment nul, ce qui exige ou que j soit nul ou que j passe par le point O.

§ 2. — *Étude de quelques mouvements.*

47. Bien qu'il n'entre pas dans nos vues de donner ici des développements comme en comporterait un traité de mécanique, nous allons appliquer la théorie précédente à quelques exemples.

Citons d'abord le mouvement rectiligne uniformément varié dans lequel le chemin parcouru s est une fonction du second degré de t, ce qu'exprime l'équation $s = a + bt + \frac{1}{2} jt^2$; les vitesses successives sont dirigées suivant la trajectoire (38) ; la première a pour expression $\frac{ds}{dt} = v = b + jt$ et la seconde $\frac{d^2s}{dt^2} = j$.

Ainsi la vitesse v varie proportionnellement avec t et l'accélération est constante ; les vitesses d'ordre supérieur sont nulles.

Nous savons que, lorsqu'on se donne la loi de variation d'une

vitesse d'un certain ordre d'un mobile, le mouvement du mobile est déterminé si l'on se donne en même temps *les conditions initiales du mouvement* (42). Nous en tirons cette conséquence : de l'équation du mouvement :

$$s = a + bt + \frac{1}{2}jt^2$$

nous avons déduit la relation $\frac{d^2s}{dt^2} = j$; réciproquement, si cette relation existe, nous en déduirons l'équation $s = a + bt + \frac{1}{2}jt^2$, pourvu que dans les deux cas les conditions initiales du mouvement (position et vitesse primitives du point) soient les mêmes.

Cette remarque est générale et chaque fois que nous déduisons de la loi du mouvement d'un mobile la loi de variation de sa vitesse d'ordre n, on peut en conclure que réciproquement cette seconde loi entraîne nécessairement la première, étant bien entendu que dans les deux cas les circonstances initiales du mouvement sont les mêmes.

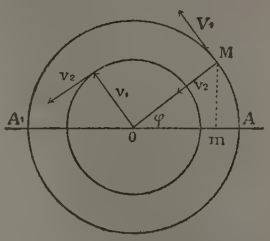
48. Soit un mobile décrivant une trajectoire curviligne quelconque avec une vitesse v constante ; l'accélération totale est la résultante de l'accélération tangentielle $\frac{d^2s}{dt^2}$ ou $\frac{dv}{dt}$ et de l'accélération normale $\frac{v^2}{\rho}$ (41) : or v étant constant $\frac{dv}{dt}$ est nul et l'accélération se réduit à l'accélération normale $\frac{v^2}{\rho}$: ainsi l'accélération dans ce mouvement est dirigée constamment suivant la normale située dans le plan osculateur de la trajectoire.

La réciproque est évidente : quand l'accélération est dirigée suivant cette normale, la vitesse du mobile est constante.

Supposons, par exemple, que le mobile décrive un cercle O d'un mouvement uniforme ; l'accélération $\frac{v^2}{\rho}$ est dirigée vers le centre O et est de plus constante, ρ étant le rayon du cercle ; on constate facilement que dans ce cas très simple les indicatrices des vitesses de différents ordres sont toutes des cercles de centre O ; quant à ces vitesses en un même point M, elles sont alternativement dirigées suivant la tangente et la normale au cercle et ont respecti-

vement pour valeurs $v_1 = \omega\rho$, $v_2 = \omega^2\rho$, $v_3 = \omega^3\rho\ldots$, ω étant la vitesse angulaire du mouvement.

Projetons ce mouvement sur le diamètre AA_1 du cercle ; soit φ l'angle MOA ; les vitesses du point m projection de M sont les projections sur AA_1 des vitesses du point M (40) ; or, ces vitesses font alternativement avec le diamètre AA_1 les angles $\frac{\pi}{2} + \varphi$, $\pi + \varphi$, $\frac{\pi}{2} - \varphi$, φ, etc. ; mais l'angle φ étant égal à ωt, on a pour les vitesses successives du point m : $-v_1 \sin \omega t$, $-v_2 \cos \omega t$, $+v_3 \sin \omega t$, etc., c'est-à-dire $-\omega\rho \sin \omega t$, $-\omega^2\rho \cos \omega t$, $+\omega^3\rho \sin \omega t$, etc.

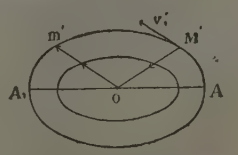


Si l'on désigne par x la distance Om, on a $x = \rho \cos \varphi$ ou $x = \rho \cos \omega t$; c'est l'équation du mouvement du point m ; en prenant les dérivées $\frac{dx}{dt}$, $\frac{d^2x}{dt^2}$, etc., on retrouverait les vitesses de m ; en comparant cette expression de x aux vitesses d'ordre pair, on voit que ces vitesses varient proportionnellement à x ; l'accélération, notamment, est proportionnelle à la distance Om. Ce mouvement du point m est le type des mouvements oscillatoires.

Projetons le mouvement circulaire que nous venons d'étudier sur un plan, les vitesses se projettent suivant les vitesses et les indicatrices suivant les indicatrices (40).

Supposons, par exemple, que le plan de projection passe par le diamètre AA_1 et appelons M_1 la projection de M, v_1', v_2', v_3', etc., les vitesses de M′ projections des vitesses v_2, v_3, ... de M.

Le cercle AMA_1 se projette suivant une ellipse, et les indicatrices, qui sont des cercles concentriques, suivant des ellipses homothétiques à l'ellipse trajectoire : les vitesses v_1', v_2', v_3', ... sont alternativement dirigées suivant la tangente à l'ellipse et le diamètre conjugué OM′.



Considérons la première indicatrice, c'est-à-dire celle que décrit l'extrémité de la première vitesse ; cette indicatrice, avons-nous dit, est une ellipse homothétique à la trajectoire ; la vitesse en M′ est donc

égale au diamètre de cette seconde ellipse conjugué à OM′; cette vitesse est par suite proportionnelle au diamètre Om' conjugué à OM′ dans la trajectoire.

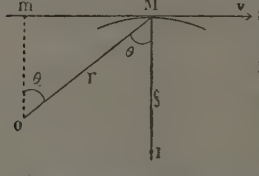
On verrait de même que l'accélération est proportionnelle à OM′. Plus généralement, les vitesses d'ordre impair sont proportionnelles à Om' et celles d'ordre pair à OM′.

Nous allons retrouver ces résultats par une autre méthode qui nous donnera de plus des lois analogues pour une trajectoire hyperbolique.

49. Dans les deux cas que nous venons d'examiner, l'accélération du mobile passe par un point fixe et, par suite, la vitesse aréolaire par rapport à ce point est constante.

Posons-nous maintenant le problème suivant : le mobile M décrit une trajectoire plane quelconque avec une vitesse aréolaire constante ω par rapport au point O; trouver la valeur de son accélération qui, comme nous le savons, passe constamment par ce point O.

Soit j cette accélération dirigée suivant MO; posons $MO = r$; la projection de j sur la normale MI à la trajectoire est l'accélération normale (41) égale à $\frac{v^2}{\rho}$, ρ étant le rayon de courbure de la trajectoire en M; si donc θ désigne l'angle OMI, on a $j\cos\theta = \frac{v^2}{\rho}$; abaissons la perpendiculaire Om sur la tangente en M, l'aire infiniment petite décrite par le rayon vecteur OM est $\frac{1}{2}\,Om\,.\,ds$ et par suite la vitesse aréolaire a pour expression $\frac{1}{2}\,Om\,.\,\frac{ds}{dt}$; ainsi l'on a $\frac{1}{2}\,Om\,.\,v = \omega$ ou $v = \frac{2\omega}{Om}$; portons cette valeur de v dans l'expression de $j\cos\theta$, il vient $j\cos\theta = \frac{4\omega^2}{Om^2}\cdot\frac{1}{\rho^2}$; mais on a $\cos\theta = \frac{Om}{r}$, il vient donc finalement :

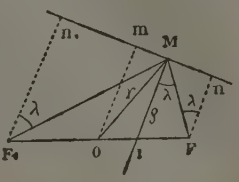


$$j = \frac{4\omega^2 . r}{Om^3 . \rho} \text{ ou } j = \frac{4\omega^2}{r^2\cos^3\theta . \rho} \quad (1)$$

Cette formule (1) nous donne la solution cherchée.

Appliquons ce résultat à deux exemples.

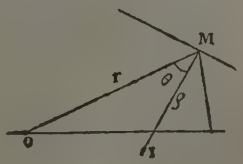
50. La trajectoire du point M est une conique dont le point O est le centre : soient F et F_1 ses foyers, Fn et F_1n_1 les perpendiculaires abaissées des foyers sur la tangente en M; partons de la formule $j = \frac{4\omega^2 r}{Om^3 . \rho}$; on a $Om = \frac{1}{2}(Fn \pm F_1n_1) = \frac{1}{2}(FM \pm F_1M)\cos\lambda$ $= a\cos\lambda$; d'où $Om^3 = a^3\cos\lambda^3$.



On en déduit : $j = \frac{4\omega^2 r}{a^3\cos^3\lambda . \rho}$; mais dans l'ellipse ou l'hyperbole le rayon de courbure ρ est égal à $\frac{b^2}{a}\frac{1}{\cos^3\lambda}$; il vient donc finalement $j = \frac{4\omega^2 r}{a^2 b^2}$; donc j est proportionnel à r; c'est le résultat que nous avions déjà trouvé pour l'ellipse; cette démonstration l'étend à l'hyperbole.

La réciproque est vraie; ainsi, quand l'accélération d'un mobile M passe par un point fixe O et varie proportionnellement à la distance MO, la trajectoire est une conique dont O est le centre.

51. Supposons en second lieu que la trajectoire soit une conique dont O est l'un des foyers. Partons de la formule $j = \frac{4\omega^2}{r^2\cos^3\theta . \rho}$.



Le rayon de courbure a pour expression $\rho = \frac{b^2}{a\cos^3\theta}$; on en déduit immédiatement $j = \frac{4\omega^2 a}{b^2 r^2}$.

Ainsi l'accélération est inversement proportionnelle au carré de la distance OM.

Réciproquement, quand l'accélération du mobile passe par un point fixe O et est inversement proportionnelle au carré de la distance OM, le mobile décrit une conique dont O est le foyer.

Ce mouvement est, comme on le sait, celui des planètes sur leurs orbites autour du soleil.

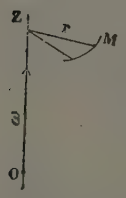
§ 3. — *Mouvements simultanés.*

52. Les mouvements les plus simples d'un solide sont, comme on sait, la translation et la rotation ; nous rappelons les propriétés principales de ces mouvements.

Dans un solide en translation, tous les points, pour un déplacement infiniment petit du solide, décrivent des chemins égaux, parallèles et de même sens.

Désignons par ds ce chemin parcouru ; si t est la variable principale, d'ailleurs *quelconque*, $\frac{ds}{dt}$ est la vitesse d'un point du solide et cette vitesse est la même en grandeur, direction et sens pour tous les points.

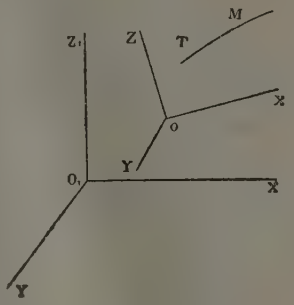
Soit un solide tournant autour de l'axe OZ : dans ce mouvement, chaque point M décrit un arc de cercle dont le centre est sur l'axe et dont le plan est perpendiculaire à cet axe ; tous les points tournent simultanément du même angle et cet angle φ est l'angle de rotation ; un point M situé à une distance r de l'axe décrit ainsi un arc de cercle égal à $r\varphi$: pour une variation $d\varphi$ de l'angle φ, la variable principale étant d'ailleurs quelconque, la vitesse v de M est $\frac{rd\varphi}{dt}$; les vitesses des différents points sont donc proportionnelles à leurs distances à l'axe et le coefficient $\frac{d\varphi}{dt}$, qui est le même pour tous les points, s'appelle la vitesse angulaire ω du solide : nous représenterons, suivant l'usage, cette vitesse par un segment de sens convenable porté sur l'axe OZ ; une vitesse angulaire sera donc pour nous un *segment*.



Ce segment détermine complètement le mouvement du solide pour la position considérée, car il donne à la fois l'axe de rotation et la vitesse de rotation, c'est-à-dire les vitesses de tous les points.

53. Un mobile M décrit une trajectoire T par rapport aux axes OX, OY, OZ pris comme repères.

Supposons maintenant que le système de repères OXYZ soit lui-même en mouvement par rapport à un autre système de repères $O_1X_1Y_1Z_1$. Le problème des mouvements simultanés se pose comme il suit :



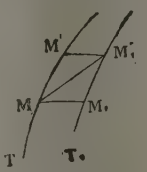
Le mouvement du point M par rapport à OXYZ et celui de OXYZ par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$ étant déterminés tous les deux par rapport à la *même* variable principale *t*, d'ailleurs quelconque, trouver la trajectoire et la loi du mouvement de M par rapport aux repères $O_1X_1Y_1Z_1$.

Nous insistons sur ce point capital que, dans cette question, le choix de la variable *t* est arbitraire, mais que tous les mouvements doivent s'exprimer en fonction *de la même* variable.

On peut supposer autant de mouvements simultanés que l'on veut, les repères $O_1X_1Y_1Z_1$ pouvant eux-mêmes être en mouvement par rapport à un troisième système de repères, et ainsi de suite.

54. Soit, dans le cas de deux mouvements simultanés, MM′ l'arc infiniment petit décrit par le mobile sur sa trajectoire T pour une variation *dt* de *t*.

Pour cette *même* variation *dt*, les repères OXYZ se déplacent par rapport aux repères $O_1X_1Y_1Z_1$, entraînant dans ce mouvement la trajectoire T qui vient en T_1 ; les points M et M′ de T viennent sur T_1 en M_1 et M_1' et MM_1' est le chemin décrit, pour la variation *dt*, par le point M à travers les repères $O_1X_1Y_1Z_1$; en procédant ainsi de proche en proche, on déterminera la trajectoire du mobile par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$. MM_1' est le chemin total et MM_1 et MM' les chemins partiels dus chacun à un *seul* des deux mouvements considérés.



Mais la figure infiniment petite $MM'M_1'M_1$ est un parallélogramme ; donc MM_1' est la résultante de MM_1 et MM' : cette propriété s'étend à un nombre quelconque de mouvements simultanés, d'où ce théorème :

Théorème. — Si ds_1, ds_2, ds_3... et dS sont les mouvements

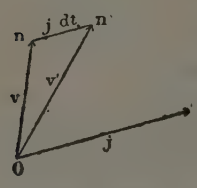
partiels et le mouvement total pour une variation commune infiniment petite dt de la variable, on a :

$$dS = ds_1 + ds_2 + ds_3 + \cdots$$

En divisant tous les termes par dt, on obtient les vitesses partielles v_1, v_2, v_3... et la vitesse totale V ; donc :

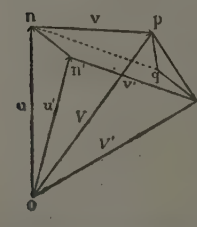
Théorème. — La vitesse totale est la résultante des vitesses partielles, ce qu'exprime la relation $V = v_1 + v_2 + v_3 + \cdots$

55. Soit un solide animé d'un mouvement de translation ; menons en O les parallèles On et On' aux vitesses d'un même point M en deux positions infiniment voisines ; si j est l'accélération, j a la direction de nn' et est égal à $\frac{nn'}{dt}$ (43) : or, pour une même position du solide, tous les points ont des vitesses égales et parallèles (52) ; donc le triangle nOn' est le même en grandeur et direction pour tous les points du solide ; par suite, les accélérations j de tous les points sont égales, parallèles et de même sens : en continuant ce raisonnement, on voit que :



Théorème. — Dans un solide en translation, pour une position quelconque de ce solide, les vitesses d'ordre n de tous les points sont égales, parallèles et de même sens.

56. Supposons que, dans deux mouvements simultanés, le mouvement d'*entraînement*, c'est-à-dire le mouvement des premiers repères OXYZ par rapport aux seconds $O_1X_1Y_1Z_1$, soit de translation ; soient pour deux positions infiniment voisines du mobile M, u et v, u' et v' ses vitesses partielles, u et u' étant les vitesses d'entraînement : les vitesses totales pour ces deux positions seront $V = u + v$ et $V' = u' + v'$ (54). Transportons les vitesses u et u' en O suivant On et On' ; transportons v et v' suivant np et $n'p'$; dans ces conditions, Op représente V et Op' V' ; complétons le parallélogramme $nn'p'q$; on voit immédiatement que nn' ou qp', pq et pp' représentent précisément (43) les deux accélérations par-



tielles j et γ et l'accélération totale J multipliées par dt; donc pp' étant la résultante de pq et qp', J est aussi la résultante de j et γ.

En raisonnant de même sur les accélérations, on démontrerait que la troisième vitesse totale est la résultante des troisièmes vitesses partielles ; de même, enfin, pour les vitesses d'ordre quelconque.

Enfin, le théorème est encore vrai pour un nombre quelconque de mouvements simultanés, tous les mouvements d'entraînement étant de translation, nous dirons donc :

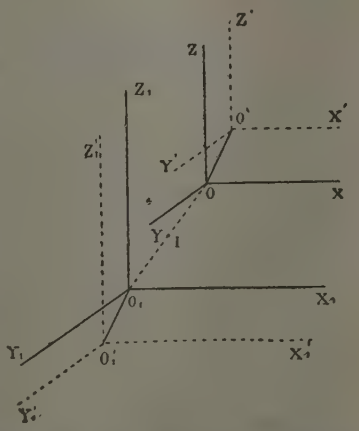
Théorème. — Quand les mouvements d'entraînement sont de translation, la vitesse totale d'ordre n est la résultante des vitesses partielles de même ordre.

Il résulte de ce théorème que dans les formules connues (43) :

$$V_n' = V_n + V_{n+1}\,dt \quad \mu(V_n') = \mu(V_n) + dt\,\mu(V_{n+1}),$$

on peut toujours remplacer chaque vitesse comme V_n par l'expression $u_n + u_n' + u_n'' + \ldots$, $u_n, u_n', u_n'' \ldots$ étant les vitesses partielles qui composées donnent la vitesse totale V_n ; de même pour les moments.

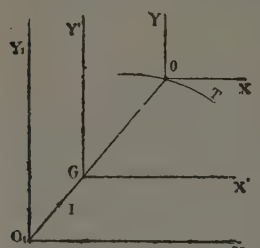
57. Ce qui précède nous amène à la question du mouvement apparent dont nous ne traiterons qu'un cas très simple : supposons que le mouvement d'entraînement des axes OXYZ soit une translation ; dans ce cas, si les axes OX_1, OY_1, OZ sont respectivement parallèles aux axes OX_1, OY_1, OZ_1, ce parallélisme subsistera : tous les points liés au système OXYZ décrivent par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$ des trajectoires identiques ; donnons-nous, par exemple, la trajectoire du point O, c'est ce qu'on appelle le mouvement apparent de O par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$, et cherchons le mouvement apparent de O_1 par rapport à OXYZ : soit O' une position voisine du point O dans son déplacement; quand le point O vient en O' les axes



OX, OY, OZ se transportent parallèlement à eux-mêmes en O′X′, O′Y′, O′Z′; tel est le mouvement de OXYZ par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$. Prenons maintenant O_1O_1' égal et parallèle à OO′ et de sens contraire, et soit $O_1'X_1'Y_1'Z_1'$ le système $O_1X_1Y_1Z_1$ transporté parallèlement en O_1', la simple inspection de la figure montre que les deux systèmes d'axes O_1 et O′ forment une figure égale à celle formée par les deux systèmes d'axes O_1' et O ; donc OO′ et O_1O_1' sont les déplacements simultanés de O par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$ et de O_1 par rapport à OXYZ.

Il en résulte évidemment que O_1' est le symétrique de O′ par rapport au milieu I de OO′ : donc finalement la trajectoire de O_1 par rapport à OXYZ est la symétrique par rapport à ce point I de la trajectoire de O par rapport à $O_1X_1Y_1Z_1$.

58. Appliquons ce qui précède à un exemple : supposons que le point O se déplace dans le plan X_1OY_1 et qu'il y décrive une trajectoire T par rapport aux axes O_1X_1, O_1Y_1; soit sur OO_1 un point G tel qu'on ait $\frac{GO}{GO_1} = \frac{m}{m_1}$, m et m_1 étant deux constantes, le point G décrit alors une courbe T′ homothétique à T et le rapport d'homothétie est $\frac{O_1G}{O_1O}$ ou $\frac{m_1}{m+m_1}$; cherchons maintenant les trajectoires de O et O_1 par rapport à GX′Y′ : le point O_1 décrit la symétrique de T′ par rapport au point I milieu de O_1G, c'est-à-dire la courbe T′ elle-même comme *forme;* quant au point O, la relation $\frac{GO}{GO_1} = \frac{m}{m_1}$ montre qu'il décrit une courbe homothétique à la trajectoire de O_1, le centre d'homothétie est G et le rapport d'homothétie $\frac{m}{m_1}$; finalement, les trajectoires de O et O_1 par rapport aux axes GX′Y′ sont la trajectoire primitive T réduite dans le rapport de $\frac{m}{m+m_1}$ pour le point O et de $\frac{m_1}{m+m_1}$ pour le point O_1.



Ce problème trouve son application dans l'étude du mouvement des planètes autour du soleil.

§ 4. — *Déplacement des solides.*

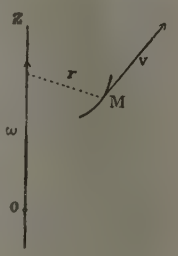
59. Le déplacement total infiniment petit d'un mobile peut résulter, d'une infinité de manières, de déplacements partiels ; nous appelons systèmes de déplacements partiels équivalents ceux qui, pour un même point, donnent le même déplacement total : soient ds_1, ds_2, ds_3... et $d\sigma_1$, $d\sigma_2$, $d\sigma_3$, etc..., deux systèmes de déplacements partiels équivalents ; le déplacement total du point est $ds_1 + ds_2 + ds_3 + \ldots$ et $d\sigma_1 + d\sigma_2 + d\sigma_3 + \ldots$ (54) ; la condition nécessaire et suffisante pour l'équivalence est donc :

$$ds_1 + ds_2 + \ldots = d\sigma_1 + d\sigma_2 + \ldots$$

En divisant tous les termes par dt, on a le théorème suivant :

Théorème. — Pour que deux systèmes de déplacements partiels soient équivalents, il faut et il suffit que les deux systèmes de vitesses partielles aient même résultante.

60. Soit un mobile animé d'un mouvement de rotation défini par le segment ω qui représente sa vitesse angulaire : la vitesse v d'un des points M du solide situé à une distance r de l'axe OZ est égale à ωr (52) ; comme, de plus, v est perpendiculaire au plan MOZ, on en déduit que :



Théorème. — La vitesse v du point M est égale en grandeur, direction et sens au moment du segment ω par rapport à M ; ainsi l'on a :

$$v = \mu(\omega).$$

Ce théorème fondamental va nous permettre de rattacher la théorie des rotations simultanées à la théorie des systèmes de segments.

Examinons en effet le déplacement total d'un solide résultant d'un système quelconque de déplacements partiels infiniment petits, ces déplacements s'effectuant par rotation ou translation du solide.

61. Supposons d'abord que les déplacements partiels soient des translations définies par les vitesses $v_1, v_2, v_3, v_4, \ldots$; la vitesse totale d'un point quelconque du solide est (54) $v_1 + v_2 + v_3$

$+ \ldots \geqslant V$; or v_1, v_2, $v_3 \ldots$ sont les mêmes pour tous les points (52) ; donc V a aussi pour tous les points même grandeur, direction et sens, et par suite le mouvement total est une translation de vitesse V.

62. Soient deux rotations simultanées définies par les vitesses angulaires ω et ω', les deux segments ω et ω' étant supposés former un couple.

D'après un théorème précédent (60), les vitesses partielles du point M pour ces deux rotations sont respectivement $\mu(\omega)$ et $\mu(\omega')$, les moments μ étant pris par rapport à M ; la vitesse totale de M est donc (54) $v \geqslant \mu(\omega) + \mu(\omega')$, c'est-à-dire le moment du couple $\omega\omega'$; or, ce moment est constant en grandeur, direction et sens pour tous les points de l'espace (26) ; donc tous les points ont même vitesse v en grandeur, direction et sens, et le déplacement total est une translation de vitesse v. Ainsi :

Théorème. — Deux rotations faisant couple équivalent à une translation.

Réciproquement, une translation de vitesse v peut toujours être remplacée par un couple de rotation de moment v. Il résulte de là que l'on peut toujours considérer un système de rotations et de translations simultanées comme composé uniquement de rotations.

63. Prenons maintenant le cas le plus général de rotations simultanées, les translations étant remplacées par des rotations.

Soient α_1, α_2, $\alpha_3 \ldots$ les segments représentant un premier système A de rotations simultanées, et β_1, β_2, $\beta_3 \ldots$ les segments qui représentent un second système B de rotations simultanées ; cherchons les conditions pour que ces deux systèmes de rotations s'équivalent. A cet effet, considérons un point M du solide ; ses vitesses partielles pour les rotations du premier système A sont (60) $\mu(\alpha_1)$, $\mu(\alpha_2)$, $\mu(\alpha_3)$, etc., et pour les rotations du second système B, $\mu(\beta_1)$, $\mu(\beta_2) \ldots$; les moments des vitesses angulaires α_1, $\alpha_2 \ldots$ β_1, $\beta_2 \ldots$ étant pris par rapport à M. Pour que les deux systèmes s'équivalent sur le point M, il faut qu'on ait :

$$\mu(\alpha_1) + \mu(\alpha_2) + \mu(\alpha_3) + \ldots \geqslant \mu(\beta_1) + \mu(\beta_2) + \ldots$$

$$\text{ou } \mu(\alpha_1\alpha_2 \ldots) \geqslant \mu(\beta_1\beta_2 \ldots),$$

ce qui exprime que les deux systèmes de segments A et B ont même moment par rapport au point M : or, nous savons que si A et B ont même moment en trois points non en ligne droite, ces deux systèmes de segments sont équivalents dans le sens qu'a cette expression lorsqu'il s'agit de segments (31) ; dès lors, les systèmes ont même moment pour un point quelconque. De là ce théorème :

Théorème. — L'équivalence des deux systèmes A et B de rotations simultanées n'est pas autre chose que l'équivalence des deux systèmes de segments représentant les vitesses angulaires de ces rotations.

64. Grâce à ce théorème, la *composition* des rotations ou des translations revient à une question déjà traitée ; nous nous bornerons à énoncer les conséquences suivantes :

1° Un système de rotations concourant en O équivaut à une rotation unique passant par le même point O et égale à leur résultante (21) ;

2° Un système de rotations parallèles équivaut à une rotation unique égale à leur somme algébrique et passant par le centre des segments parallèles qui représentent ces rotations (23) ;

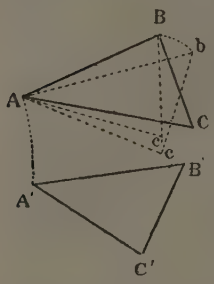
3° Un système de rotations formant couple deux à deux équivaut à un couple unique de rotations, c'est-à-dire à une translation (27) ;

4° Un système de rotations quelconques peut toujours se ramener, soit à deux rotations (28), soit à une rotation et à une translation [couple de rotations] (30) ; dans ce dernier cas, on peut toujours choisir la translation de façon à ce qu'elle ait même direction que le segment qui représente la rotation, il suffit de choisir l'axe central du système (32).

De la sorte, le mouvement infiniment petit du solide est une translation suivant l'axe central et une rotation autour de ce même axe ; c'est le mouvement hélicoïdal.

65. Il est facile de passer de là à un déplacement infiniment petit, le plus général d'un solide : soient deux positions infiniment voisines s s' de ce solide ; la coïncidence des deux figures se réduit évidemment à la coïncidence d'un triangle ABC de l'une avec le triangle correspondant A′B′C′ de l'autre ; or, une première ro-

tation ω autour d'un axe situé dans le plan perpendiculaire à AA′ en son milieu amènera le point A′ en A ; le triangle A′B′C′ aura ainsi la position A*bc* ; les côtés A*b* et AB étant égaux, on peut les faire coïncider par une seconde rotation ω_1 passant par A et perpendiculaire au plan AB*b*, ce qui amènera le triangle mobile dans la position ABc′ ; enfin, une troisième rotation ω_2 autour de AB amènera *c*′ en C et les deux solides coïncideront ; remplaçons maintenant les deux rotations ω_1, ω_2 qui concourent en A par la rotation résultante ω′ et nous voyons que le déplacement total équivaut aux deux rotations ω et ω′.



Remarquons encore que la première rotation ω peut évidemment être remplacée par une translation ; donc :

Théorème. — Tout déplacement infiniment petit d'un solide équivaut, soit à deux rotations, soit à une translation et à une rotation.

Si le solide a un point fixe A, la première rotation ω est supprimée et il reste la seconde ω′ qui passe par le point A ; c'est le cas du *pivotement*.

Théorème. — Le pivotement d'un solide autour d'un de ses points A est une rotation autour d'un axe passant par ce point.

Enfin, si le solide se réduit à une figure plane, on voit aisément que les rotations ω et ω′ sont normales au plan de la figure quand on l'astreint à rester dans ce plan ; dès lors, ces rotations parallèles équivalent à une seule. Ainsi :

Théorème. — Le mouvement infiniment petit d'une figure dans son plan est une rotation autour d'un axe perpendiculaire à ce plan.

66. Dans le cas le plus général, prenons l'axe central des rotations ; le mouvement du solide sera alors une translation parallèle à cet axe et une rotation autour du même axe. Ainsi :

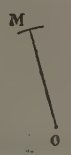
Théorème. — Tout déplacement infiniment petit d'un solide est un mouvement héliçoïdal.

L'axe central s'appelle pour cette raison l'axe instantané. Le

déplacement des figures a été étudié très longuement ; il constitue une véritable géométrie tout entière à laquelle on a donné le nom de géométrie cinématique.

Nous allons indiquer très succinctement comment cette géométrie se rattache aux principes que nous venons de formuler.

67. Soit, dans une figure plane O le centre instantané, c'est-à-dire le point où l'axe instantané de rotation perpendiculaire à ce plan le rencontre ; dans la rotation autour de O chaque point M décrit un élément de trajectoire qui se confond avec un arc de cercle de centre O ; donc :

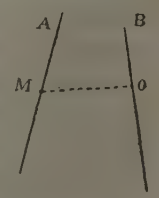


Théorème. — Les normales aux trajectoires de tous les points de la figure passent à chaque instant par le centre instantané.

Nous citerons encore le théorème suivant :

Théorème. — Dans le mouvement d'une figure plane, la courbe lieu des centres instantanés dans la figure mobile roule sans glisser sur la courbe lieu des centres instantanés dans le plan ; en un mot, le mouvement d'une figure plane est toujours un mouvement épicycloïdal.

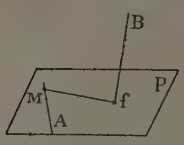
68. Passons aux solides dans l'espace ; nous savons que tout déplacement infiniment petit peut être effectué d'une infinité de manières par deux rotations autour des droites A et B ; ce sont ces droites que nous avons appelées conjuguées dans la théorie de la composition des segments (34) : prenons un point M du solide situé sur A ; des deux rotations partielles qui entraînent M, celle autour de A est sans effet, le point M étant sur cet axe ; dès lors le mouvement total de M est sa rotation autour de B ; dans cette rotation le point M décrit un arc élémentaire appartenant à une circonférence dont le centre O est sur B ; de plus, le plan BOM est normal à cet arc ; donc :



Théorème. — Les plans normaux aux trajectoires de tous les points d'une droite A de la figure passent par sa conjuguée B.

69. Soit un plan P appartenant à la figure mobile et M un point de ce plan ; menons par M une droite quelconque A du plan, cette droite A étant située dans le plan P, sa conjuguée B passe par le foyer f de ce plan (29) ; mais le plan normal à la tra-

jectoire du point M situé sur la droite A passe par sa conjuguée B (68) ; dès lors f M appartient à ce plan normal et est normale à la trajectoire de M. Donc :

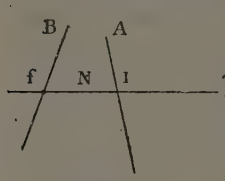


Théorème. — Les normales, situées dans le plan P, aux trajectoires de tous les points de ce plan passent par son foyer.

Nous avons vu que les plans normaux aux trajectoires de tous les points de B passaient par sa conjuguée A (68) ; donc le plan normal à la trajectoire du point f situé sur cette droite B est le plan P lui-même. Ainsi :

Théorème. — Le plan P est normal à la trajectoire que décrit son foyer.

70. Nous terminerons par un dernier théorème. Soit MN une normale à la trajectoire du point M : supposons que cette normale rencontre la droite A au point I. Soit P le plan AIM; MI normale, située dans ce plan, à la trajectoire du point M, passe par le foyer f de P; mais A étant situé dans le plan P, sa conjuguée B passe aussi par le point f, donc MN rencontre aussi B.



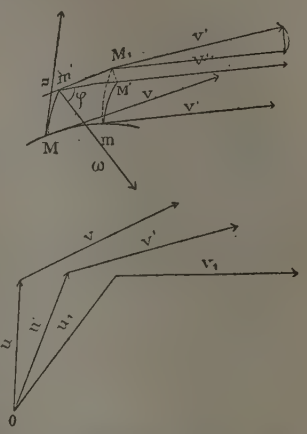
Théorème. — Toute normale à la trajectoire d'un point qui rencontre une droite A rencontre aussi sa conjuguée B.

Toutes ces propositions peuvent d'ailleurs se démontrer directement sans qu'il soit nécessaire de passer par la théorie des mouvements simultanés.

71. Nous allons, pour terminer, examiner ce que devient l'accélération d'un mobile pour un changement quelconque des repères, problème que nous avons déjà résolu (56) dans le cas particulier où les repères primitifs ont un mouvement de translation par rapport aux nouveaux. Dans le cas le plus général, le déplacement infiniment petit des premiers axes OXYZ par rapport aux seconds $O_1X_1Y_1Z_1$ peut toujours être obtenu par des rotations $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \ldots$; or, de quelque manière qu'on ramène ces rotations à une translation et à une rotation ω, ω est toujours la résultante de $\omega_1, \omega_2, \omega_3 \ldots$; en d'autres termes, ω est fixe en grandeur, direction et sens, quelle que soit la translation.

Cela posé, soit Mm l'élément de la trajectoire primitive décrit par le mobile M pendant la variation dt de la variable.

Le déplacement de la trajectoire pour cette même variation dt peut s'obtenir par une translation amenant Mm en m'M$'$ et une rotation ω amenant m'M$'$ en m'M$_1$, de sorte que M$_1$ est la position définitive du mobile : soient u et v les deux vitesses partielles de M, u étant la vitesse d'entraînement, u' et v' celles de M$'$, u_1 et v_1 celles de M$_1$; enfin désignons par V, V$'$ et V$_1$ les vitesses totales de M, M$'$ et M$_1$, par J, J$'$ et J$_1$ leurs accélérations totales : nous avons J$'$ par la formule connue J$'dt = V'$ − V dans laquelle V, V$'$ sont respectivement égaux à $u + v$ et $u' + v'$; nous allons maintenant déduire u_1 et v_1 de u' et de v', ce qui nous donnera V$_1$.



On a mM$_1 = m$M$'$ + M$'$M$_1$; en divisant par dt, on en conclut que u_1 est la résultante de u' et de la vitesse $\frac{\text{M}_1\text{M}'}{dt}$ dirigée suivant M$_1$M$'$; or M$_1$M$'$ est l'arc de cercle décrit par le fait de la rotation ω pour la variation dt de la variable.

Le rayon de ce cercle est la distance de M$_1$ à ω ou, ce qui revient au même, m'M$_1 \sin\varphi$, φ étant l'angle de ω avec la trajectoire donc cette vitesse $\frac{\text{M}_1\text{M}'}{dt}$ est égale à $\omega dt \frac{m'\text{M}_1}{dt} \sin\varphi$ ou $\omega . dt . v . \sin\varphi$; elle est de plus normale à la trajectoire et à ω. Ainsi on a:

$$u_1 = u' + \omega dt\, v \sin\varphi \qquad (1)$$

Cherchons v_1; v_1 est égal à v' et sa direction est celle de v' après une rotation de vitesse ω; on a donc ainsi :

$$v_1 = v' + \omega dt\, v \sin\varphi \qquad (2)$$

formule dans laquelle $\omega\ dt\ v' \sin\varphi$ représente également une vitesse perpendiculaire à la trajectoire et à ω.

On peut, d'ailleurs, remplacer v' par v qui n'en diffère que d'un infiniment petit : il vient alors en composant (1) et (2) :

$$u_1 + v_1 = V_1 = u' + v' + 2\omega dt\, v \sin\varphi = V' + 2\omega dt\, v \sin\varphi.$$

Or, on a :

$$J_1 = \frac{V_1 - V}{dt} = \frac{V' - V}{dt} + 2\omega v \sin\varphi = J' + 2\omega v \sin\varphi \quad (3)$$

Nous savons d'ailleurs que J' est la résultante des deux accélérations partielles du mobile ; la formule (3) donne l'accélération dite *complémentaire* $2\omega v \sin\varphi$ qu'il faut composer avec J' pour avoir l'accélération totale J_1 ; nous rappelons que cette accélération complémentaire est normale à la trajectoire primitive et à ω ; φ est l'angle de v et de ω.

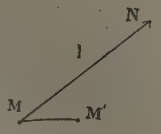
72. En résumé, il résulte de la composition des vitesses partielles d'ordre quelconque que le changement des repères modifie généralement les vitesses en grandeur et en direction, puisque la vitesse totale primitive n'est plus qu'une composante de la vitesse totale par rapport aux nouveaux repères ; cette remarque a une importance capitale. Toutefois, il y a un cas où les vitesses d'ordre n restent les mêmes, c'est quand le mouvement d'entraînement est une translation dont la vitesse d'ordre n est nulle : par exemple, les accélérations restent les mêmes quand le mouvement d'entraînement est une translation rectiligne et uniforme.

§ 5. — *Action des segments. Conclusions.*

73. On définit comme on sait le travail élémentaire d'une force F pour un déplacement infiniment petit MM' du mobile le produit F. MM' cos φ, φ étant l'angle de F avec MM'. Or, plusieurs conséquences importantes de cette définition sont indépendantes de la notion de la force ; dès lors il nous paraît préférable de remplacer simplement la force par le segment qui la représente et d'établir cette théorie pour les segments, quitte à donner ensuite à ces segments telle ou telle signification : dans ces conditions, l'expression de travail n'aurait pas sa raison d'être ; nous la remplacerons donc par le mot action et nous dirons :

Soit MN un segment quelconque l qui se déplace ; pour une

variation infiniment petite dt de la variable t, son point initial M décrit un arc infiniment petit $MM' = ds$; l'*action* élémentaire de ce segment pour ce déplacement est le produit $l.\ ds\cos\widehat{l.\ ds}$.



L'action pour un déplacement fini quelconque du point M est la somme de ses actions élémentaires.

La plupart des grandeurs qu'on étudie en mécanique sont, comme les vitesses, par exemple, des grandeurs algébriques ayant *une direction*; il convient de remarquer qu'au contraire l'action d'un segment est simplement une grandeur algébrique.

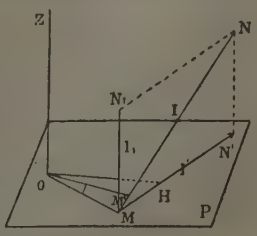
74. Nous nous bornerons à énoncer les théorèmes suivants qui sont des conséquences immédiates de la définition que nous venons de poser.

Théorème. — L'action élémentaire $l.\ ds\cos\widehat{l.\ ds}$ est nulle : 1° quand l est nul ; 2° quand le point M est immobile ; 3° quand le déplacement MM′ est normal à la direction du segment.

Théorème. — Si le segment l est la résultante de divers segments $l_1, l_2, l_3\ldots$ ayant leur point initial en M, l'action élémentaire de l pour le déplacement MM′ est la somme algébrique des actions de $l_1, l_2, l_3\ldots$ pour ce même déplacement.

Théorème. — Si le déplacement total MM′ est la résultante des déplacements partiels $ds_1, ds_2, ds_3\ldots$ l'action de l pour le déplacement total est la somme algébrique des actions de l pour les divers déplacements partiels.

75. Supposons que le mouvement élémentaire du point M soit une rotation d'angle $d\varphi$ autour de l'axe OZ ; ce point décrit alors dans un plan P perpendiculaire à OZ un arc de cercle MM′ de centre O et de rayon r, r étant la distance du point M à l'axe. Mais on peut considérer le segment l comme la résultante de sa projection l' sur le plan P et d'un segment l_1 normal au plan P ; dès lors l'action de l est la somme algébrique des actions de l_1 et de l' ; or l_1 étant normal au déplacement MM′ donne une action

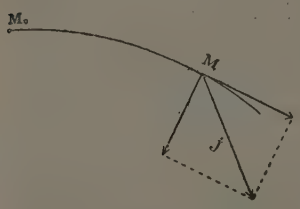


nulle ; donc l'action de l ne diffère pas de l'action de sa projection l' ; on a ainsi pour cette action $l' \times MM' \times \cos \widehat{l'\,MM'} = l'\, rd\varphi \cos \widehat{l'\,.\,MM'} = l'\,.\,OH\,.\,d\varphi$, OH étant la perpendiculaire à MN' ; or $l'\,.\,OH$ est la valeur μ_z du moment de l par rapport à l'axe OZ ; ainsi on a pour l'action cherchée $d\varphi\,.\,\mu_z(l)$. De là ce théorème :

Théorème. — Pour une rotation d'angle $d\varphi$ du point M autour de l'axe OZ l'action d'un segment quelconque MN est égale au moment de ce segment par rapport à l'axe multiplié par $d\varphi$.

Il faut bien remarquer qu'il s'agit seulement de la valeur algébrique du moment, car l'action n'a pas de *direction* comme le moment.

76. Soit M_0M le déplacement fini d'un mobile, cherchons pour ce déplacement l'action de l'accélération j.



Cette accélération est la résultante de l'accélération tangentielle $\frac{d^2s}{dt^2}$ et de l'accélération normale $\frac{v^2}{\rho}$ (41) ; l'action de l'accélération normale est évidemment nulle ; il reste donc l'action de l'accélération tangentielle, laquelle action est égale à $\frac{d^2s}{dt^2}\,ds$: l'action cherchée est ainsi $\int_{M_0}^{M} \frac{d^2s}{dt^2}\,ds$; or $\frac{ds}{dt}$ étant égal à v, $\frac{d^2s}{dt^2}$ est égal à $\frac{dv}{dt}$; on a donc $\int_{M_0}^{M} \frac{d^2s}{dt^2}\,ds = \int_{M_0}^{M} v\,dv = \frac{1}{2}(v^2 - v_0^2)$, v_0 étant la vitesse en M_0. De là ce théorème très important :

Théorème. — L'action de l'accélération pour un déplacement fini quelconque du mobile est égale au demi-accroissement du carré de la vitesse pendant ce déplacement.

77. En résumé, la cinématique, telle que nous venons d'en indiquer succinctement les parties principales, est une conception rigoureusement géométrique, et cependant elle nous donne tous

les théorèmes de la cinématique matérielle basée sur la notion du temps.

D'ailleurs, cette dernière n'est évidemment qu'une application particulière de notre cinématique géométrique : nous dirons plus, pour passer de la cinématique pure à la cinématique appliquée, il n'est nullement nécessaire de choisir l'angle de rotation de la terre pour variable principale ; tous les théorèmes démontrés sont indépendants du choix de la variable qui sert à mesurer le temps ; cette remarque est extrêmement importante, car elle nous montre que la cinématique est une science bien plus générale qu'on ne l'avait cru jusqu'ici.

Ainsi les théorèmes fondamentaux qu'expriment les relations suivantes :

$$v_n' \equiv v_n + v_{n+1}dt \qquad \mu(v_n') \equiv \mu(v_n) + d t \mu(v_{n+1}) \quad (43)$$

et

$$V_1 \equiv v_1 + v_2 + v_3 + \dots \quad (54)$$

sont vrais dans l'univers, qu'on prenne pour variable t l'angle de la rotation terrestre ou l'arc décrit par une planète quelconque sur son orbite ou telle autre grandeur que l'on voudra.

Nous dirons donc pour conclure :

1° Il existe une cinématique vraiment rationnelle et absolument indépendante de toute notion empruntée à l'univers ;

2° La cinématique matérielle, qui n'est qu'une application de la précédente, est indépendante du choix de la variable qui sert à mesurer le temps.

CHAPITRE IV.

Définition et propriétés de la masse.

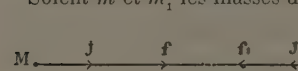
§ 1er. — *De la mesure du temps en dynamique.*

78. Cherchons maintenant si le choix de la variable qui sert à mesurer le temps est indifférent en dynamique comme en cinématique.

Admettons provisoirement les bases de la dynamique telle qu'on l'expose habituellement ; dans cet ordre d'idées on emprunte à l'expérience un certain nombre de principes fondamentaux dont l'un, celui de l'action et de la réaction, peut s'énoncer ainsi :

Deux points matériels quelconques M et M_1 échangent entre eux des forces f et f_1 égales et contraires et dirigées suivant MM_1.

Soient m et m_1 les masses des deux points, j et j_1 leurs accélérations, le temps étant, bien entendu, mesuré par l'angle de la rotation terrestre ; les forces f et f_1 étant respectivement égales aux produits mj et $m_1 j_1$, on a $mj = m_1 j_1$ ou $\frac{j}{j_1} = \frac{m_1}{m}$; la loi de l'action et de la réaction peut dès lors s'énoncer comme suit :



1° Deux points quelconques échangent des accélérations j et j_1 dirigées en sens inverse suivant la droite qui les joint.

2° Ces accélérations sont entre elles dans le rapport inverse des masses des deux points.

79. La loi ainsi dédoublée, occupons-nous de la première partie ; cette première partie ne contient ni l'idée de force ni l'idée de masse ; elle est simplement une loi sur la direction des accélérations de deux points en présence. Maintenant faisons abstraction des considérations qui nous ont amené à formuler ainsi cette loi et supposons-la déduite directement de l'expérience.

Remarquons bien la différence qui existe entre notre point de vue et celui des auteurs ; ces derniers font entrer dans les principes fondamentaux qu'ils empruntent à l'expérience une notion, celle de la force qui n'est pas définie, tandis que dans le principe énoncé ci-dessus, il ne s'agit que de l'accélération, grandeur connue et étudiée en cinématique : nous rappelons encore que cette accélération est prise par rapport à une variable t bien déterminée, l'angle de la rotation terrestre dans le système des étoiles fixes, c'est-à-dire la mesure ordinaire du temps.

Or, que devient cette loi sur les directions des accélérations quand on change les repères ou la variable ?

80. Nous avons vu d'abord que, lorsqu'on change de repères, les accélérations prennent d'autres directions ; donc dans le cas actuel les accélérations des deux points M et M_1 cesseront, après le changement des repères, d'être dirigées suivant MM_1 (72) ; il faut toutefois excepter le cas où les repères primitifs ont un mouvement de translation rectiligne et uniforme par rapport aux nouveaux : ce cas excepté, nous voyons que la loi de direction des accélérations ne peut être vraie que pour un *seul système de repères ;* ce système est celui des étoiles fixes.

Cette remarque très importante paraît avoir échappé aux auteurs ; il ne nous semble pas qu'aucun d'eux, en énonçant la loi de l'action et de la réaction, ait vu nettement que cette loi était liée à un choix particulier des repères.

81. Voyons maintenant l'influence d'un changement de la variable t sur notre loi de direction.

Nous avons vérifié expérimentalement cette loi, avons-nous dit, en mesurant le temps par l'angle de la rotation terrestre.

Or nous avons montré (37) que tout changement de variable modifiait la direction de toutes les vitesses, sauf la première, et notamment la direction de l'accélération : cela à la condition de considérer comme non distinctes les variables proportionnelles (37).

Donc, si les accélérations des deux points M et M_1 sont dirigées suivant MM_1 pour une variable déterminée t, qui est l'angle de la rotation terrestre, elles n'ont cette direction que pour cette variable seulement.

L'angle de la rotation terrestre est donc dans l'univers une variable unique jouissant, à l'exclusion de toute autre, d'une propriété caractéristique, celle de donner pour deux points des accélérations dirigées suivant la droite qui les joint.

Nous sommes fondé maintenant à adopter cette variable particulière, car nous savons qu'aucune autre ne pourrait nous donner les mêmes résultats.

Ainsi se trouve justifié le choix de l'angle de la rotation terrestre pour mesurer le temps.

Nous supposerons donc toujours en dynamique que le temps est mesuré par l'angle de la rotation terrestre ; il y a là une différence capitale entre la cinématique et la dynamique.

§ 2. — *Définition de la masse.*

82. La première partie de la loi de l'action et de la réaction nous a donné la mesure du temps ; la seconde partie va nous donner la définition de la masse.

Les accélérations j et j_1, avons-nous dit, sont inversement proportionnelles aux masses m et m_1.

Nous exprimerons la même propriété en disant : chaque point a un coefficient numérique constant tel que deux points quelconques échangent, à chaque instant, des accélérations inversement proportionnelles à leurs coefficients respectifs.

Ce sont ces coefficients numériques constants que nous appellerons les masses des points.

Remarquons bien qu'il faut considérer la propriété précédente comme vérifiée expérimentalement pour un nombre quelconque de points à la fois ; dans ce cas, ce sont des accélérations *partielles* qu'échangent deux points quelconques.

83. Dans la loi de l'action et de la réaction ainsi formulée :

$$mj = m_1 j_1 \qquad \text{(a)}$$

les repères, avons-nous dit, sont le système des étoiles fixes et la variable principale l'angle de la rotation terrestre : un changement des repères ou de la variable modifiera évidemment la forme de l'équation (a) ; mais la nouvelle formule contiendra encore les masses m et m_1 qui sont des constantes ; ces masses seront sim-

plement engagées d'une autre façon dans l'équation des mouvements des deux points.

Par suite, les masses sont des constantes qu'on retrouve toujours, quels que soient le système des repères et la variable principale : sous ce point de vue, la masse peut se définir comme il suit :

Les masses sont des coefficients numériques fixes attachés aux points et dont dépend le mouvement de ces points, pour des repères et une variable principale quelconques.

Cette définition de la masse nous amène tout naturellement à étudier, avant la dynamique qui suppose un choix particulier des repères et de la variable, les propriétés de la masse qui sont indépendantes de ce choix.

C'est cette étude que nous allons faire succinctement et d'une façon exclusivement géométrique en considérant la masse comme un nombre qui s'adjoint à chaque point, ce qui est une conception purement mathématique.

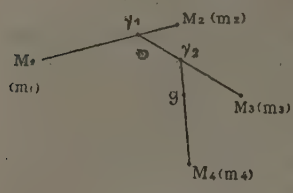
§ 3. — *Centres de gravité.*

84. C'est en partant de cette idée de la masse considérée simplement comme un *nombre* que plusieurs auteurs ont traité en géométrie la théorie des centres de gravité ; cette marche nous paraît la seule rationnelle, car il est tout à fait inutile de faire intervenir dans cette question la considération de la pesanteur, le centre de gravité d'une figure géométrique ne dépendant en rien de son poids. C'est donc le point de vue géométrique que nous adopterons ici, ce qui rentre d'ailleurs dans le plan général que nous nous sommes tracé, d'établir une mécanique géométrique.

Nous appellerons masse d'un système de points la somme des masses de ces points ; remarquons d'ailleurs qu'il n'y a aucun inconvénient à considérer la masse comme un nombre algébrique, c'est-à-dire susceptible de signe.

85. Soient un système de points $M_1, M_2 \ldots$ de masses $m_1, m_2 \ldots$; prenons sur $M_1 M_2$ le point γ_1 tel que l'on ait $\frac{\gamma_1 M_1}{\gamma_1 M_2} = \frac{m_2}{m_1}$ et attribuons à γ_1 une masse $m_1 + m_2$. Prenons de même sur $\gamma_1 M_3$ un

point γ_2 de masse $(m_1 + m_2) + m_3$ qui divise $\gamma_1 M_3$ dans le rapport inverse des masses $m_1 + m_2$ et m_3 ; en continuant ainsi jusqu'au dernier point M, on a un point g dont la masse est celle du système $m_1 + m_2 + \ldots$ et qui est le centre de gravité.



On démontre, comme on sait, que ce point est indépendant de l'ordre dans lequel on prend successivement les divers points du système.

La propriété capitale du centre de gravité s'énonce comme suit :

Théorème. — Si l'on projette obliquement ou orthogonalement sur un plan quelconque un système de points et leur centre de gravité, le produit de la masse du centre de gravité par sa projetante est égal à la somme des produits analogues pour tous les points du système.

Nous ne reproduirons pas la démonstration bien connue de ce théorème.

Supposons les points rapportés à trois axes de coordonnées et soient $x_1 y_1 z_1$, $x_2 y_2 z_2$,... les coordonnées des points, XYZ celles de leur centre de gravité ; le théorème précédent nous donne

$$X = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots} \quad Y = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots} \quad Z = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots}$$

86. Nous énoncerons également sans démonstration les théorèmes suivants qui sont très connus :

Théorème. — Le centre de gravité d'un système de points reste le même quand les masses de tous ces points sont modifiées dans un même rapport ; la masse du centre de gravité varie dans le même rapport.

Théorème. — Lorsqu'on projette un système de points sur un plan ou sur une droite avec leurs masses ou des masses proportionnelles, le centre de gravité se projette suivant le centre de gravité des points projetés.

Si plusieurs groupes de points S_1, S_2, S_3... ont respectivement

pour centres de gravité les points $\gamma_1\gamma_2\gamma_3\ldots$, l'ensemble de ces groupes a pour centre de gravité le centre de gravité g des points $\gamma_1\gamma_2\gamma_3$.

Théorème. — Dans deux systèmes de points homothétiques ou semblables, où les points homologues ont même masse ou des masses proportionnelles, les centres de gravité sont des points homologues.

87. Nous passerons des systèmes de points aux figures géométriques de la façon suivante.

Pour donner plus de généralité au langage, nous appellerons *étendue* d'une figure son volume, son aire ou sa longueur suivant qu'il s'agira d'un volume, d'une surface ou d'un arc.

Cela posé, considérons l'étendue totale E d'une figure comme la somme d'étendues infiniment petites dans tous les sens $e_1 + e_2 + e_3 + \ldots$ et attribuons à chacun des éléments $e_1e_2e_3\ldots$ des masses qui leur soient proportionnelles ; chaque élément devient à la limite un point ; le centre de gravité de ces éléments points est, par définition, le centre de gravité de la figure. Les masses pouvant varier proportionnellement sans que le centre de gravité change, on est toujours libre de prendre pour masses les étendues elles-mêmes $e_1e_2\ldots$; dans ce cas, la masse du centre de gravité est l'étendue totale de la figure.

Tous les théorèmes précédents s'appliquent dès lors aux figures.

Soient $x_1x_2x_3\ldots$. X les projetantes des éléments $e_1e_2e_3\ldots$ et du centre de gravité G de la figure par rapport à un plan, on aura, d'après le théorème des projetantes :

$$X = \frac{e_1x_1 + e_2x_2 + \ldots}{E}$$

Le calcul de X est ainsi ramené à une intégration.

On obtiendra de même les projetantes Y et Z de G par rapport à deux autres plans, ce qui déterminera le point G.

88. Nous nous bornerons à énoncer les théorèmes suivants qui pour la plupart sont analogues aux précédents :

Théorème. — Si une figure d'étendue E est la somme de diverses figures d'étendue E_1, E_2, etc., le centre de gravité de E est le centre de gravité des divers centres de gravité de E_1, $E_2\ldots$

En particulier, si les centres de gravité de E_1, E_2... sont dans un même plan ou sur une même droite, le centre de gravité de E est aussi dans ce plan ou sur cette droite.

Théorème. — Les centres de gravité de deux figures homothétiques ou semblables sont des points homologues.

Théorème. — Dans une figure à centre, le centre est le centre de gravité.

Théorème. — La portion de volume comprise entre deux sections parallèles infiniment voisines a, à la limite, même centre de gravité que ces sections.

Nous aurions un théorème analogue pour une portion d'aire plane comprise entre deux droites parallèles infiniment voisines.

Lorsque dans une figure toutes les sections parallèles ont leurs centres de gravité situés sur une même droite ou dans un même plan, cette droite ou ce plan contiennent le centre de gravité de la figure.

Théorème. — Lorque, dans une figure, toutes les cordes parallèles ont leurs centres de gravité, c'est-à-dire leurs milieux situés sur une même droite ou dans un même plan, cette droite ou ce plan contiennent le centre de gravité de la figure.

A l'aide de ces divers théorèmes on obtient très facilement les centres de gravité des figures géométriques les plus simples.

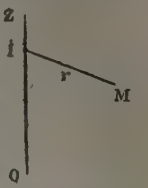
89. On peut aussi étudier des figures géométriques ou le rapport de la masse m, à l'étendue infiniment petite e_1, rapport que nous avons supposé constant, varie d'un point à l'autre de la figure suivant une loi donnée ; on a alors ce qu'on appelle des figures hétérogènes, par opposition aux figures homogènes ; le rapport variable $\frac{m_1}{e_1}$ s'appelle la densité au point considéré ; les figures homogènes sont donc celles où la densité est constante.

La recherche des centres de gravité des figures à densité variable est une simple question de géométrie, nous ne nous étendrons pas davantage sur ce sujet.

§ 4. — *Moments d'inertie.*

90. Les points doués de masses donnent encore lieu à une théorie purement géométrique, celle des moments d'inertie.

Cette théorie étant très connue, nous nous bornerons à rappeler la définition et les propriétés les plus importantes des moments d'inertie par rapport à un axe OZ. Soient un système de points et M l'un de ces points de masse m, situé à une distance MI égale à r de OZ, le moment d'inertie du système est Σmr^2.



Supposons que l'axe OZ contienne le centre de gravité du système de points et soit O_1Z_1 un second axe parallèle au premier situé à une distance d de celui-ci.

On a, en désignant par Σmr_1^2 le moment d'inertie par rapport à O_1X_1 et par M la masse totale du système :

$$\Sigma mr_1^2 = \Sigma mr^2 + Md^2.$$

Cette relation est fondamentale.

91. Passons maintenant aux moments d'inertie d'un même système de points par rapport à tous les axes concourant en un point donné que nous prendrons comme origine des coordonnées.

Si α, β et γ sont les cosinus des angles que forme une droite quelconque OR, on démontre que le moment I du système, par rapport à OR, peut toujours s'exprimer par la formule

$$I = A\alpha^2 + B\beta^2 + C\gamma^2 \qquad (1)$$

cela, pour des axes convenablement choisis ; de plus, dans cette formule, A, B et C sont les moments d'inertie du système par rapport à ces axes.

Si l'on porte sur OR à partir du point O une longueur OM égale à $\frac{1}{\sqrt{I}}$, le lieu du point M a pour équation :

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 1 \qquad (2)$$

C'est un ellipsoïde qu'on appelle l'ellipsoïde d'inertie du point O. Les axes de cet ellipsoïde sont les axes principaux du système pour le point O, et les moments A, B et C les moments d'inertie principaux.

Il y a pour chaque point de l'espace un ellipsoïde d'inertie; celui qui est relatif au centre de gravité est l'ellipsoïde central.

92. Nous citerons les théorèmes suivants relatifs à l'ellipsoïde central.

Théorème. — Si, sur l'un des axes principaux OX de l'ellipsoïde central, on prend un point O_1, l'ellipsoïde d'inertie pour le point O_1 a l'un de ses axes principaux dirigé suivant OO_1.

Théorème. — Si le point O_1 est situé dans l'un des plans principaux OXY de l'ellipsoïde central, l'ellipsoïde d'inertie en O_1 a aussi ce plan pour plan principal.

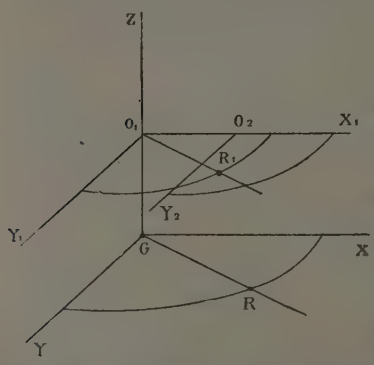
93. Étudions maintenant les moments d'inertie par rapport à toutes les droites d'un plan P: si d'abord on prend toutes les droites de ce plan qui passent par un même point O_1, on a évidemment pour ce point O_1 une *ellipse d'inertie* intersection du plan P et de l'ellipsoïde d'inertie relatif au point O_1.

Cela posé, choisissons pour plan des XY un plan parallèle à P passant par le centre de gravité G de la figure; le plan des XY coupe l'ellipsoïde central suivant une ellipse d'inertie, et nous supposerons qu'on prenne les axes de cette ellipse pour axes des X et des Y.

L'axe des Z sera perpendiculaire au plan des XY et le plan P sera $X_1O_1Y_1$.

L'ellipse d'inertie du point G dans le plan des XY étant rapportée à ses axes a pour équation

$$Ax^2 + By^2 = 1 \quad (1)$$



A et B étant les moments d'inertie par rapport à GX et GY. Si GR est une droite rencontrant, dans le plan des XY, l'ellipse d'inertie en R, le moment d'inertie par rapport à GR est, d'après la définition même de l'ellipse d'inertie, $\frac{1}{GR^2}$; menons par O_1 la parallèle O_1R_1 à GR, R_1 étant le point où cette parallèle rencontre l'ellipse d'inertie de O_1, le moment d'inertie

par rapport à O_1R_1 est $\frac{1}{O_1R_1^2}$; or, les deux axes O_1R_1 et GR étant parallèles et le second passant par le centre de gravité, on a, en désignant par M la masse totale : $\frac{1}{O_1R_1^2} = \frac{1}{GR^2} + M \cdot \overline{GO_1}^2$. On en déduit aisément que l'ellipse d'inertie en O_1 a pour axes O_1X_1 et O_1Y_1 et que son équation est :

$$\left(A + M \cdot \overline{GO_1}^2\right) x^2 + \left(B + M \cdot \overline{GO_1}^2\right) y^2 = 1 \qquad (2)$$

On vérifie facilement que pour un point quelconque de O_1X_1 ou de O_1Y_1 l'ellipse d'inertie située dans le plan X_1Y_1 a l'un de ses deux axes dirigé suivant O_1X_1 et O_1Y_1.

Cherchons en particulier l'équation de l'ellipse d'inertie du point O_2 situé sur O_1X_1.

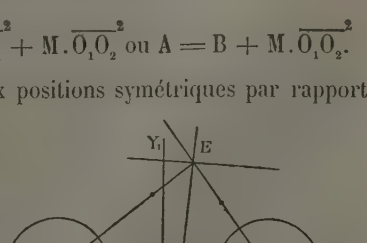
Le moment d'inertie par rapport à O_2X_1 est connu, c'est $A + M \cdot \overline{GO_1}^2$; celui par rapport à la direction perpendiculaire O_2Y_2 est évidemment égal au moment d'inertie B par rapport à GY augmenté de $M \times \overline{O_2G}^2$, O_2G étant la distance de O_2Y_2 et de GY; mais $\overline{O_2G}^2 = \overline{GO_1}^2 + \overline{O_1O_2}^2$; dès lors l'équation cherchée est par rapport à O_2X_2 et O_2Y_2

$$\left(A + M \cdot \overline{GO_1}^2\right) x^2 + \left(B + M \cdot \overline{GO_1}^2 + M \cdot \overline{O_1O_2}^2\right) y^2 = I \qquad (3)$$

Supposons A > B : on voit alors que pour valeur particulière de O_1O_2, positive et négative, on a :

$$A + M \cdot \overline{GO_1}^2 = B + M \cdot \overline{GO_1}^2 + M \cdot \overline{O_1O_2}^2 \text{ ou } A = B + M \cdot \overline{O_1O_2}^2.$$

Ce qui donne pour O_2 deux positions symétriques par rapport à O_1 sur O_1, X_1; pour ces deux positions l'équation (3) représente un cercle.



Ainsi pour toutes les droites du plan X_1Y_1 passant par ces deux points, les moments d'inertie sont égaux et leur valeur commune est $A + M \cdot \overline{GO_1}^2$; soient F et F' ces deux points; cherchons

l'ellipse d'inertie en un point quelconque E du plan ; les moments d'inertie par rapport à EF et EF′ sont, d'après ce qui précède, égaux à $A + M \cdot \overline{GO_1}^2$; dès lors, dans l'ellipse cherchée ces deux directions sont celles de rayons vecteurs égaux ; par suite, les axes de cette ellipse sont les deux bissectrices des droites EF et EF′. Cette construction très simple nous donne les axes de l'ellipse d'inertie d'un point quelconque du plan ; cette propriété peut s'énoncer sous la forme suivante :

Théorème. — Les axes de l'ellipse d'inertie d'un point quelconque du plan sont les tangentes aux deux coniques du plan passant par ce point et ayant les points F et F′ pour foyers.

94. Cherchons de même, étant donné l'ellipsoïde central

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 = 1 \qquad (1)$$

les axes de l'ellipsoïde d'inertie en un point quelconque O_1 de l'espace : nous allons d'abord chercher l'équation de cet ellipsoïde rapporté à des axes parallèles à ceux de l'ellipsoïde central, O_1 étant l'origine des coordonnées.

Menons par O et O_1 des droites parallèles L et L_1 qui font avec les axes des coordonnées des angles dont les cosinus sont α, β et γ.

Le moment d'inertie par rapport à L est :

$$I = A\alpha^2 + B\beta^2 + C\gamma^2.$$

Si d est la distance des parallèles L et L_1, le moment d'inertie par rapport à L_1 est :

$$I_1 = A\alpha^2 + B\beta^2 + C\gamma^2 + Md^2.$$

Mais on a, $x_1 y_1 z_1$ étant les coordonnées du point O_1 :

$$d^2 = (z_1\beta - y_1\gamma)^2 + (x_1\gamma - z_1\alpha)^2 + (y_1\alpha - x_1\beta)^2.$$

On en déduit :

$$I_1 = [A + M(y_1^2 + z_1^2)]\,\alpha^2 + \ldots - 2M\,[y_1 z_1 \beta\gamma + \ldots]$$

Par suite, l'équation de l'ellipsoïde d'inertie en O_1 est :

$$[A + M(y_1^2 + z_1^2)]\,X^2 + \ldots - 2M\,(y_1 z_1 YZ + \ldots) = 1 \qquad (2)$$

Nous rappelons que si une surface du second ordre est représentée par l'équation

$$Ax^2 + A'y^2 + A''z^2 + 2BYZ + 2B'XZ + 2B''XZ = D$$

les directions λ, μ, ν d'un quelconque de ses trois axes sont données par les formules

$$\left[(S-A)B+B'B''\right]\lambda=\left[(S-A')B'+BB''\right]\mu=\left[(S-A'')B''+BB'\right]\nu$$

S étant racine de l'équation :

$$\frac{B'B''}{(S-A)B+B'B''}+\frac{BB''}{(S-A')B'+BB''}+\frac{BB'}{(S-A'')B''+BB'}-1=0$$

En appliquant ces formules à l'équation (2), on obtient, toutes réductions faites, et r^2 représentant la quantité $x_1^2+y_1^2+z_1^2$:

$$\frac{\lambda}{\dfrac{x_1}{\dfrac{A-S}{M}+r^2}}=\frac{\mu}{\dfrac{y_1}{\dfrac{B-S}{M}+r^2}}=\frac{\nu}{\dfrac{z_1}{\dfrac{C-S}{M}+r^2}} \qquad (3)$$

et

$$\frac{x_1^2}{\dfrac{A-S}{M}+r^2}+\frac{y_1^2}{\dfrac{B-S}{M}+r^2}+\frac{z_1^2}{\dfrac{C-S}{M}+r^2}=1 \qquad (4)$$

Si dans ces équations on considère $x_1y_1z_1$ comme des coordonnées courantes et r^2 comme une constante, l'équation (4) représente une surface du second ordre passant par le point O_1 et $\lambda\,\mu\,\nu$ sont les cosinus des angles que forme avec les axes des coordonnées la normale en O_1 à cette surface.

La surface (4) ne varie qu'avec S et r^2 de sorte qu'elle est toujours homofocale à la surface dont l'équation :

$$\frac{x_1^2}{\dfrac{A}{M}}+\frac{y_1^2}{\dfrac{B}{M}}+\frac{z_1^2}{\dfrac{C}{M}}=1 \qquad (5)$$

De là ce théorème :

Théorème. — Les axes de l'ellipsoïde d'inertie en un point quelconque de l'espace sont les normales aux trois surfaces homofocales à la surface (5) qui passent par ce point.

On peut dire ainsi que les axes de l'ellipsoïde d'inertie en un point sont les axes du cône circonscrit à la surface (5) et ayant ce point pour sommet.

Si S_1, S_2 et S_3 sont les trois racines de l'équation en S (4), l'ellipsoïde d'inertie en O_1 rapporté à ses axes a pour équation

$$S_1x^2+S_2y^2+S_3z^2=1 \qquad (6)$$

On déduit très facilement de la théorie des surfaces homofocales le théorème suivant que nous nous bornons à énoncer :

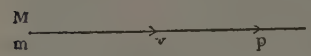
L'ellipsoïde d'inertie (6) est de révolution pour un point quelconque des coniques focales de l'ellipsoïde (5).

Enfin supposons que dans l'équation (4) S soit constant, ce qui veut dire que l'ellipsoïde d'inertie (6) a un axe constant, le lieu des points de l'espace pour lesquels cela a lieu est évidemment représenté par l'équation (4) où $x_1 y_1 z_1$ sont des coordonnées courantes, r^2 étant remplacé par $x_1^2 + y_1^2 + z_1^2$; ce lieu est ce qu'on appelle la surface de l'onde dont nous n'avons pas à rappeler ici les propriétés remarquables.

§ 5. — *Puissances des points.*

95. Nous allons supposer maintenant que les points dont nous avons étudié le mouvement en cinématique aient une masse : cela nous amène à considérer de nouvelles grandeurs analogues aux vitesses et auxquelles nous donnerons le nom de puissances ; nous les définirons comme il suit :

Soit v une vitesse d'ordre quelconque du point M dont la masse est m, la puissance correspondante est un segment dirigé suivant v et égal à $v \times m$.



Les puissances peuvent être totales ou partielles comme les vitesses ; elles sont, comme les vitesses, relatives à la variable principale t qu'on a choisie : nous avons dit que la cinématique s'établissait tout entière sans un choix particulier de la variable t ; la notion de la masse étant aussi indépendante de la variable t, nous en concluons que l'étude des puissances n'impose aucun choix particulier de la variable t ; c'est pourquoi cette étude reste en dehors de la dynamique proprement dite.

Remarquons en passant l'*analogie* qu'il y a entre la première puissance d'un point $m \times v$ et ce qu'on appelle la quantité de mouvement, expression qui nous paraît tout à fait impropre et que nous n'emploierons pas ; de même, la seconde puissance, produit de la masse par l'accélération est analogue à la force ; mais remarquons bien que c'est là une simple analogie, car la quantité

de mouvement et la force sont des notions qui appartiennent à la dynamique et supposent par conséquent un choix particulier de la variable t, tandis qu'ici nous ne supposons rien de semblable : toutefois, nous allons retrouver dans cette étude quelques propriétés connues des quantités de mouvement et des forces ; nous en conclurons que ces propriétés sont indépendantes du choix de la variable.

96. Lorsqu'il s'agit d'un point unique, les propriétés des puissances ne diffèrent pas de celles des vitesses ; les puissances n'étant en effet que les vitesses multipliées par la masse m du point, toute relation homogène entre des vitesses a lieu aussi entre les puissances correspondantes. De là les théorèmes suivants qu'il suffit d'énoncer :

Théorème. — Lorsqu'on projette le mouvement d'un point sur une droite ou sur un plan, les puissances du point projeté sont les projections des puissances du point dans l'espace (40).

Théorème. — Dans un mouvement rectiligne, toutes les puissances sont dirigées suivant la trajectoire (38).

Théorème. — La trajectoire d'un mobile et son mouvement sur cette trajectoire sont bien déterminés lorsqu'on se donne les circonstances initiales du mouvement pour une valeur t_0 de la variable t et les valeurs successives de la puissance d'ordre n pour chaque valeur de t (42).

Théorème. — Si p_n et p_n' sont les puissances d'ordre n pour deux positions infiniment voisines M et M′ du mobile et p_{n+1}, la puissance d'ordre $n+1$ pour la position M, on a, dt étant la variation de dt relatif au déplacement MM′ :

$$p_n' = p_n + p_{n+1}dt \qquad (1)$$

De plus, si l'on considère l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment p_n transporté parallèlement en un point fixe, p_{n+1} est la vitesse de cette extrémité sur cette indicatrice (43).

Théorème. — Les notations étant les mêmes, on a en prenant les moments par rapport à un point quelconque :

$$\mu(p_n') = \mu(p_n) + dt\mu(p_{n+1}) \qquad (2)$$

De plus, $\mu(p_{n+1})$ est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment $\mu(p_n)$ [43].

Si dans les équations (1) et (2) on suppose $n = 1$ et si l'on projette les puissances et leurs moments sur une droite, on a des théorèmes qui ne diffèrent pas, quant à la forme, de ceux connus en dynamique sous le nom de théorème des quantités de mouvement projetées sur un axe et de théorème des moments des quantités de mouvement par rapport à un axe.

97. Le théorème relatif aux vitesses partielles devient le théorème suivant pour les puissances.

Théorème. — La première puissance totale d'un point est la résultante de ses premières puissances partielles (54).

Il en est de même des puissances d'ordre quelconque quand les mouvements d'entraînement sont de translation (56).

Le théorème relatif à ce que nous avons appelé l'accélération complémentaire (71) dans le cas de deux mouvements simultanés, quand le mouvement d'entraînement est quelconque s'étend sans difficulté aux secondes puissances, ce qui donne lieu à une seconde puissance complémentaire, égale à l'accélération complémentaire multipliée par la masse du point.

98. Reprenons la formule

$$\int_{M_0}^{M} \frac{d^2s}{dt^2}\, ds = \frac{1}{2}\,(v^2 - v_0^2)$$

qui exprime le théorème sur l'action de l'accélération pour un déplacement fini M_0M du mobile (76) ; en multipliant le premier membre par la masse m du mobile, on a évidemment l'action de la seconde puissance ; multiplions de même par m le second membre, nous avons $\frac{1}{2}\,mv^2 - \frac{1}{2}\,mv_0^2$; nous donnerons à l'expression $\frac{1}{2}\,m\,v^2$ le nom d'énergie du point : de là le théorème suivant :

Théorème. — L'action de la seconde puissance pour un déplacement fini quelconque du mobile est égale à l'accroissement de l'énergie du mobile pendant ce déplacement.

C'est, sous une forme un peu différente, le théorème du travail et des forces vives ; nous n'emploierons pas cette expression de forces vives que rien ne justifie.

99. Pour généraliser les théorèmes des aires et surtout pour

les étendre à plusieurs points, nous modifierons un peu notre définition de l'aire.

Remarquons, en effet, que pour remplacer les vitesses par les puissances dans les théorèmes sur les aires, il faut multiplier par la masse m; dès lors, les aires elles-mêmes sont multipliées par cette masse ; pour cette raison, nous conviendrons d'appeler aire pour un point doué de masse l'aire cinématique multipliée par la masse : de même, la vitesse aréolaire pour un point de masse m sera la vitesse aréolaire telle que nous l'avons définie en cinématique multipliée par m. Ces définitions posées, on en déduit les théorèmes suivants :

Théorème. — La vitesse aréolaire du mobile par rapport à un point O est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité de l'axe des aires (44).

Théorème. — La vitesse aréolaire est égale en grandeur, direction et signe au demi-moment de la première puissance mv, les aires et les moments étant pris par rapport au même point O (45).

La formule établie en cinématique (45) devient d'après cela :

$$\omega' = \omega + \frac{1}{2}\, dt\mu(mj).$$

On en déduit immédiatement, dans le cas d'une trajectoire plane, le théorème suivant (46) :

Théorème. — Lorsque dans un mouvement plan la seconde puissance passe par un point fixe O, l'aire décrite par le rayon vecteur qui joint ce point O au mobile est proportionnelle à la variation correspondante de t.

La réciproque est vraie.

100. Tous les théorèmes précédents n'ont rien de nouveau et ils sont tout à fait équivalents aux théorèmes analogues démontrés en cinématique ; c'est qu'en effet, quand il s'agit du mouvement d'un point unique, la notion de la masse est inutile, puisque la masse n'intervient dans les équations que comme un facteur commun qu'on peut toujours supprimer.

Il n'en est plus de même lorsque l'on considère plusieurs points.

Nous rappelons que, dans tout ce qui suit, le centre de gravité est toujours supposé avoir pour masse la masse de tout le système de points.

Dans des points en mouvement, il y a un centre de gravité pour l'ensemble des positions de ces points correspondant à une même valeur de la variable t ; le centre de gravité est ainsi lui-même un mobile ayant une masse égale à la somme des masses de tous les points.

101. Nous démontrerons d'abord le théorème suivant qui est fondamental.

Théorème. — La puissance d'un certain ordre du centre de gravité est la résultante de translation des puissances de même ordre de tous les points du système.

Soient $m_1, m_2, m_3 \ldots$ les masses des points du système, M la somme de ces masses, c'est-à-dire la masse du centre de gravité ; soient $x_1 y_1 z_1$, $x_2 y_2 z_2 \ldots$ XYZ, les coordonnées de ces points et du centre de gravité par rapport à trois axes.

Prenons d'abord les premières puissances $p_1\ p_2\ p_3 \ldots$ de tous les points et la première puissance P du centre de gravité ; il s'agit de démontrer la formule :

$$\mathrm{P} = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots \qquad (1)$$

Or, on a (85) :

$$\mathrm{MX} = \Sigma m_1 x_1$$

on en déduit :

$$\mathrm{M}d\mathrm{X} = \Sigma m_1 dx_1 \text{ ou } \mathrm{M}\frac{d\mathrm{X}}{dt} = \Sigma m_1 \frac{dx_1}{dt}. \qquad (2)$$

$\frac{d\mathrm{X}}{dt}, \frac{dx_1}{dt}, \frac{dx_2}{dt} \ldots$ sont respectivement les projections de la vitesse du centre de gravité et des vitesses des divers points sur l'axe des x; donc $\mathrm{M}\frac{d\mathrm{X}}{dt}$, $m_1\frac{dx_1}{dt}$, etc., sont les projections sur ce même axe de P, p_1, p_2, etc. Il suit de là que la projection de P sur l'un quelconque des axes est égale à la somme des projections de $p_1, p_2 \ldots$ sur ce même axe ; donc P est la résultante de translation de p_1, $p_2 \ldots$, ce qui démontre la relation (1) [14].

Désignons maintenant par $q_1, q_2, q_3 \ldots$ et Q les puissances de second ordre des points et de leur centre de gravité.

L'équation (2) différentiée une seconde fois donne $M\frac{d^2X}{dt} = \Sigma m_1 \frac{d^2x_1}{dt^2}$; or $\frac{d^2X}{dt^2}, \frac{dx_1}{dt^2} \ldots$ sont les projections sur l'axe des x des secondes vitesses; par suite, $M\frac{d^2x}{dt^2}, m_1\frac{d^2x_1}{dt_2}$, etc., sont les projections des secondes puissances $Q_1, q_1, q_2 \ldots$; on en déduit comme précédemment que Q est la résultante de translation q_1, q_2, q_3.

En continuant le même raisonnement, on voit que le théorème est vrai pour des puissances d'ordre quelconque.

102. Ce théorème rappelle, pour les deux premières puissances, le théorème très connu relatif aux quantités de mouvement et aux forces transportées parallèlement au centre de gravité.

On peut évidemment remplacer, dans la composition des puissances, la puissance totale d'un point quelconque par ses puissances partielles de même ordre.

Lorsque l'on connaît les mouvements des divers points d'un système, le théorème que nous venons de démontrer détermine complètement le mouvement du centre de gravité.

Nous citerons encore les deux conséquences suivantes :

Théorème. — Pour que le centre de gravité d'un système de points soit immobile, il faut et il suffit que la résultante de translation des premières puissances de tous les points soit nulle.

Car alors la première puissance et par suite la première vitesse du centre de gravité sont nulles.

Théorème. — Pour que le centre de gravité d'un système de points ait un mouvement rectiligne et uniforme, il faut et il suffit que la résultante de translation des premières puissances de tous les points soit fixe en grandeur, direction et sens, ou, ce qui revient au même, que la résultante de translation des secondes puissances soit nulle.

103. Le théorème qu'exprime pour un point unique la formule :

$$p_n' = p_n + p_{n+1}\,dt \qquad (97)$$

s'étend immédiatement aux résultantes de translation P_n', P_n et P_{n+1} des puissances de tous les points d'un système, puisque ces

résultantes sont les puissances d'un point unique, le centre de gravité du système. Ainsi l'on a :

$$P_n' = P_n + P_{n+1}\,dt.$$

De plus, P_{n+1} est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment P_n.

104. Prenons de même l'équation

$$\mu(p_n') = \mu(p_n) + dt\mu(p_{n+1}).$$

Chaque point du système donne une équation du même genre ; en composant membre à membre toutes ces équations, on voit qu'on aura la même relation entre les résultantes des moments $\mu(p_n')$, $\mu(p_n)$ et $\mu(p_{n+1})$.

De plus, la résultante des moments $\mu(p_{n+1})$ est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité de la résultante des moments $\mu(p_n)$.

Remarquons encore que, lorsque l'on compose les puissances, l'indicatrice relative à leur résultante est la même pour tous les points de l'espace ; il n'en est pas de même des moments qui varient d'un point à l'autre de l'espace.

105. Supposons que la résultante de $\mu(p_n)$ soit constante en grandeur, direction et sens, les moments étant pris par rapport à un point O : dans ce cas, la résultante de $\mu(p_{n+1})$ est nulle ; cela posé, considérons pour tous les points du système les puissances d'ordre $n+1$; ramenons ces puissances à leur résultante et à un couple en O : ce couple est évidemment nul, puisque son moment est précisément la résultante de $\mu(p_{n+1})$; donc, dans ce cas, les puissances d'ordre $n+1$ peuvent se ramener à un segment unique passant par O.

106. Supposons qu'on évalue les aires de tous les points par rapport au point O à partir de positions initiales correspondant à une même valeur de la variable t, par exemple à partir de $t = 0$.

Soient pour une valeur quelconque de t, a_1, a_2, a_3... les axes des aires des différents points, les aires étant prises en tenant compte des masses, posons :

$$A = a_1 + a_2 + a_3 + \dots$$

Projetons ces aires sur un plan quelconque P que nous supposerons passer par O et soit OZ la normale à ce plan.

Nous avons vu que les projections de ces aires sur P sont respectivement représentées par les projections des axes a_1, a_2, a_3... sur OZ (*44*) : la somme des aires projetées est donc représentée par la somme de ces axes projetés sur OZ ou, ce qui revient au même, par la projection de A sur OZ. En particulier, la somme des aires projetées sur P sera maxima quand OZ aura la direction de A, c'est-à-dire quand le plan P sera perpendiculaire à A.

A est l'axe des aires du système pour la valeur considérée t de la variable et le plan perpendiculaire à A est, pour cette même valeur de la variable, le plan du maximum des aires.

107. Soient ω_1, ω_2, ω_3... les vitesses aréolaires des divers points du système ; il est évident que si l'on projette les aires sur le plan P, les vitesses aréolaires des points projetés seront respectivement les projections de ω_1, ω_2, ω_3, sur la normale OZ à ce plan ; posons dès lors :

$$\Omega = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots$$

La somme des projections de ω_1, ω_2, etc., sur OZ est égale à la projection de Ω sur OZ, de sorte qu'on a, en accentuant les lettres qui désignent les projections :

$$\Omega' = \omega_1' + \omega_2' + \omega_3' + \dots$$

Or $\omega_1' + \omega_2' + \omega_3' + \dots$ représente évidemment la somme des aires projetées, décrites par tous les points pour une variation très petite dt de la variable, cette somme étant divisée par dt.

Pour cette raison, nous appellerons Ω la vitesse aréolaire totale du système ; sa projection Ω' sur OZ est la vitesse aréolaire totale du système projeté sur le plan P.

Soient v_1, v_2, v_3... j_1, j_2, j_3... les vitesses et les accélérations des points mobiles dont les masses sont m_1, m_2, m_3...

En cinématique, c'est-à-dire pour des points sans masse, la vitesse aérolaire est égale en grandeur, direction et signe à la moitié du moment de la vitesse du mobile, soit $\frac{1}{2}\mu(v_1)$; d'après la définition des aires pour les points doués de masse, on aura donc

$$\omega_1 = \frac{1}{2}\mu(m_1 v_1),\quad \omega_2 = \frac{1}{2}\mu(m_2 v_2),\quad \omega_3 = \frac{1}{2}\mu(m_3 v_3)\dots$$

d'où, en composant membre à membre :

$$\omega_1 + \omega_2 + \ldots = \Omega = \frac{1}{2}\mu(m_1 v_1, m_2 v_2, m_3 v_3 \ldots) \text{ Donc :}$$

Théorème. — La vitesse aréolaire totale est égale en grandeur, direction et signe au demi-moment des premières puissances de tous les mobiles.

108. En procédant comme en cinématique, on déduit immédiatement de cette formule, en appliquant le théorème relatif aux moments des puissances (104) :

$$\Omega' = \Omega + \frac{1}{2}\mu(m_1 j_1, m_2 j_2, m_3 j_3 \ldots).$$

Lorsque les secondes puissances $m_1 j_1$ $m_2 j_2$, etc., ont toujours un moment nul en O, c'est-à-dire lorsqu'elles admettent une résultante unique passant par O (105), Ω est constant en grandeur, direction et sens.

Mais la vitesse aréolaire totale Ω est, comme la vitesse aréolaire ω en cinématique (44), la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité de l'axe des aires A. Donc, dans le cas actuel, cette extrémité décrit une ligne droite avec une vitesse constante Ω ; en d'autres termes, A est fixe en direction et comme grandeur proportionnel à t. De là ce théorème :

Théorème. — Quand les secondes puissances des mobiles ont, pour toutes les valeurs de la variable t, une résultante unique passant par un point fixe O, l'axe des aires du système en ce point est proportionnel à t et fixe de direction ; le plan du maximum des aires, qui est perpendiculaire à cet axe, est par suite invariable.

Ce théorème a une importance capitale : remarquons qu'il est vrai pour un point quelconque de l'espace quand les secondes puissances ont une résultante constamment nulle.

La réciproque est vraie dans le cas général.

109. Reprenons le théorème qu'exprime la formule (98) :

$$u_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 - \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

u_1 étant l'action de la seconde puissance du point mobile de masse m_1.

On a pour un système quelconque de mobiles, les actions étant prises pour des déplacements finis simultanés de tous les mobiles :

$$\Sigma u_1 = \Sigma \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 - \Sigma \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

$\Sigma \frac{1}{2} m_1 v_1^2$ est ce que nous appelons l'énergie du système.

De là ce théorème :

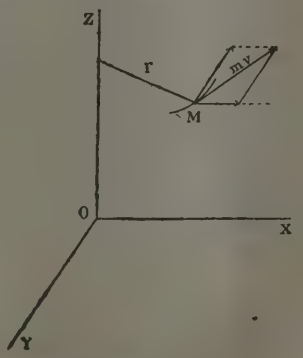
Théorème. — Dans un système de mobiles, la somme des actions des secondes puissances pour tous les mobiles, pendant une variation déterminée de la variable t est égale à l'accroissement de l'énergie du système pendant cette même variation.

110. Nous allons, à titre d'application, composer les premières puissances d'un système de points formant une figure de forme invariable dont nous supposerons le centre de gravité immobile ; dans ce cas, la résultante de translation des premières puissances est nulle (102).

Prenons ce centre de gravité comme origine des coordonnées O et cherchons par rapport à ce point le moment des premières puissances $\mu(m_1 v_1, m_2 v_2 \ldots)$.

Le déplacement instantané de la figure, le point O étant fixe, est une rotation infiniment petite autour d'un axe passant par O (65) ; prenons cet axe de rotation pour axe des Z et soient OX et OY les deux autres axes perpendiculaires entre eux et à OZ.

Nous aurons le moment cherché en O en composant les moments pris par rapport aux trois axes OX, OY et OZ.



Si ω est la vitesse angulaire de la rotation autour de OZ, le moment du point M (x, y, z) par rapport à OZ est $mv \times r$, r étant la distance du point à OZ ; on a donc :

$$\mu_z(mv) = mv \times r = m\omega r^2$$

et par suite :

$$\mu_z(m_1 v_1, m_2 v_2 \ldots) = \omega \Sigma m r^2.$$

Pour avoir μ_x et μ_y, décomposons mv suivant OX et OY ; les

deux composantes sont $m\omega y$ et $m\omega x$ et les deux moments suivant OX et OY, $\omega\Sigma myz$ et $\omega\Sigma mxz$.

Si l'on suppose que les axes OX, OY et OZ sont les axes principaux de l'ellipsoïde d'inertie en O, les expressions Σmyz et Σmxz sont nulles (91) et, par suite, le moment total $\mu(m_1v_1, m_2v_2, m_3v_3\ldots)$ en O se réduit à $\omega\Sigma mr^2$.

On passe de là très simplement au cas général.

Prenons toujours comme axes des coordonnées les axes de l'ellipsoïde d'inertie et soit ω la vitesse angulaire passant par O; on peut remplacer cette rotation totale ω par les trois rotations partielles ω_x, ω_y et ω_z, ω_x, ω_y et ω_z étant les projections de ω sur les axes OX, OY, OZ.

A chacune de ces rotations partielles correspond un système de premières puissances partielles; ces puissances partielles pour la rotation ω_x donnent pour moment, d'après ce qui précède, ω_xI_x, I_x étant le moment d'inertie par rapport à OX.

De même, aux deux autres rotations ω_y et ω_z correspondent les moments ω_xI_x et ω_zI_z.

Donc finalement, le moment $\mu(m_1v_1, m_2v_2\ldots)$, pour le déplacement total ω, est la résultante des moments ω_xI_x, ω_yI_y et ω_zI_z dirigés suivant les axes.

Ce moment $\omega_xI_x + \omega_yI_y + \omega_zI_z = \mu(m_1v_1, m_2v_2, m_3v_3\ldots\ldots)$ joue un rôle important dans le mouvement des corps de forme invariable.

111. L'étude géométrique que nous venons de faire sur les masses et les puissances des mobiles nous servira de trait d'union entre la cinématique et la dynamique.

Nous rappelons à nouveau que tous les théorèmes établis jusqu'ici sont indépendants de tout choix particulier des repères et de la variable t.

Au contraire, la dynamique, ainsi que nous l'avons montré (81), repose tout entière sur un choix unique des repères et de la variable.

CHAPITRE V.

Dynamique.

§ 1er. — *Définition de la force.*

112. C'est une idée empruntée à la philosophie la plus ancienne que la force est la cause du mouvement.

Scientifiquement, cette idée n'a aucune valeur ; dans l'univers le mouvement se manifeste quand deux portions de matière sont en présence ; mais il n'est pas scientifique d'aller chercher au delà de ce fait la cause première du mouvement ; le rôle de la science est de déterminer non pas la cause première d'un phénomène, mais seulement les conditions dans lesquelles il se manifeste et les circonstances qui l'accompagnent.

Euler, croyons-nous, a remarqué le premier que les équations où figure la force ne retiennent rien de cette idée de causalité qu'on accepte au commencement de la mécanique ; on peut même dire plus : qu'on parte de l'hypothèse inverse en considérant le mouvement comme la cause de la force, et la mécanique subsistera telle quelle tout entière sans autre modification ; il résulte évidemment de là que cette idée de causalité est en tout cas inutile à la mécanique.

113. En réalité, la force n'est qu'une simple circonstance du mouvement comme les masses, les vitesses, les puissances de divers ordres : il y a entre le mouvement et la force non pas relation de cause à effet, mais dépendance mutuelle, comme entre les deux coordonnées d'une courbe plane définie par une équation.

Habitués à entendre dire que la force est la cause du mouvement, nous ne sentons plus ce que cette locution a d'étrange et d'antiscientifique ; au fond, c'est comme si l'on disait que dans cette courbe plane l'ordonnée est la cause de l'abscisse.

Laissons donc là cette hypothèse de causalité qui appartient à la métaphysique et voyons comment l'idée de force est introduite en mécanique.

114. On admet au commencement de la dynamique, comme empruntés à l'expérience, un certain nombre de principes fondamentaux qui sont de véritables postulata ; ces principes consistent dans l'énoncé de quelques propriétés de la force, lesquelles permettent d'établir par le raisonnement pur toutes les autres propriétés de la force ; dès lors, ils contiennent évidemment une véritable définition de la force : la définition d'une chose, en mathématiques, est en effet l'énoncé d'une ou d'un certain nombre de ses propriétés d'où l'on déduit toutes les autres.

Nous ne voyons pas dès lors pourquoi les auteurs prétendent qu'on ne définit pas la force : c'est comme si l'on disait que le cercle est une courbe non susceptible de définition et qu'on nous demandât ensuite d'admettre, comme postulatum, la propriété des rayons égaux.

On ferait d'ailleurs disparaître la contradiction que nous signalons en disant :

« La force est une grandeur ayant une direction et un sens et « jouissant des propriétés suivantes..... », après quoi on énoncerait ces principes fondamentaux, loi de l'inertie, etc...

Ce serait là une définition ; nous n'insistons pas davantage sur ce point parce que cette définition est à la fois compliquée et confuse ; nous allons voir en effet qu'on peut en donner une beaucoup plus simple.

115. Nous avons dit qu'en prenant pour repères les étoiles fixes et pour variable principale l'angle de la rotation terrestre, l'observation des mouvements dans l'univers nous conduisait à la loi suivante (82) :

« Les accélérations étant prises par rapport aux repères et à la « variable que nous venons d'indiquer, deux points quelconques « échangent des accélérations partielles ou totales dirigées suivant « la droite qui les joint et en raison inverse des masses de ces « deux points. »

Cette loi est bien connue sous le nom de la loi de l'action et de la réaction, mais par le fait elle restait encore à découvrir, car aucun auteur ne paraît avoir même soupçonné les conséquences que nous en tirons.

C'est la loi fondamentale de tous les mouvements que nous

offre l'univers, attractions des corps célestes, répulsions des molécules gazeuses, attractions et répulsions électriques et magnétiques, etc. ; elle est en un mot pour tous les mouvements ce que la loi de Newton est pour les mouvements des corps célestes seulement.

Elle sert de base à la dynamique et pour cette raison nous lui donnerons le nom de loi dynamique.

116. Cela posé, laissons de côté l'origine expérimentale de cette loi qu'on peut formuler ainsi (83) :

$$mj = m_1 j_1 \qquad \text{(a)}$$

étant entendu que j et j_1 sont dirigés suivant la droite qui joint les deux mobiles considérés.

Cette formule ne contient que des notions purement *géométriques,* l'accélération et la masse ; ces grandeurs ont été définies et étudiées géométriquement ; par conséquent, la formule (a) peut être considérée comme exprimant une relation géométrique entre des grandeurs géométriques.

Cette remarque est très importante, car elle nous conduit à une dynamique géométrique : toutes les conséquences de l'équation (a) sont en effet *nécessaires* et elles ne dépendent en aucune façon de leur réalisation plus ou moins approximative dans le monde matériel.

Nous dirons donc, en nous plaçant à ce point de vue :

La dynamique géométrique est l'étude du mouvement de points doués de masses pour lesquels les accélérations de tous les mobiles satisfont, à chaque instant, à la loi (a) par rapport à des repères et à une variable principale convenablement choisis.

Nous ajouterons que le choix des repères et de la variable est unique.

117. La loi dynamique prend une forme plus simple quand on se sert de la notion des puissances : mj et $m_1 j_1$ étant en effet des secondes puissances, on peut dire simplement que deux points quelconques échangent des secondes puissances égales et contraires dirigées suivant la droite qui les joint.

Nous passons de là à la définition géométrique de la force ; nous dirons :

Dans un système de points dynamiques satisfaisant à la loi (a)

la force d'un point est le produit de sa masse par son accélération, dirigée suivant cette accélération, ou, si l'on veut, la seconde puissance de ce point.

Remarquons en effet que, d'après la forme même de la loi dynamique (a), la seconde puissance doit jouer en dynamique un rôle particulier ; il est donc tout naturel de lui donner un nom spécial ; c'est pourquoi nous l'appelons la force.

La force ou seconde puissance dépend évidemment, en grandeur et direction, comme l'accélération elle-même, du choix des repères et de la variable t ; il convient donc de préciser notre définition de la force en indiquant les repères et la variable choisis : nous supposerons que dans cette définition les repères peuvent être quelconques, mais que la variable t est la variable unique par papport à laquelle la loi (a) existe.

118. Lorsque les forces sont prises par rapport aux repères adoptés dans la loi (a), cette loi exprime que deux points échangent des forces égales et contraires dirigées suivant la droite qui les joint.

Mais ces repères sont les seuls pour lesquels les forces d'un système de points dynamiques sont ainsi opposées deux à deux ; pour tout autre système de repères cela n'a plus lieu et les forces des deux points ne sont plus dirigées suivant la droite qui les joint.

Cette remarque a son importance, car elle nous montre en quelque sorte deux catégories de forces selon que les repères sont ou ne sont pas ceux adoptés dans la loi dynamique (a).

Ces deux *catégories* de forces se retrouvent, bien entendu, dans la nature ; nous venons d'en énoncer le caractère distinctif, mais il ne faut pas, comme certains auteurs qui ont vaguement aperçu cette différence entre les forces, considérer seulement les forces de la première catégorie, c'est-à-dire celles qui s'opposent deux à deux, comme des forces physiques ; en réalité, dans l'univers toutes les forces sont physiques, quel que soit le point de vue auquel on se place.

La force étant ainsi définie géométriquement, nous allons montrer comment toute la dynamique peut être établie d'une façon rigoureusement géométrique.

Dans tout ce qui suit nous renonçons définitivement à toutes les expressions qui rappellent pour la force l'idée de cause que nous avons rejetée ; ainsi nous ne dirons pas : « la force qui *sol-* « *licite* un point, la force qui *détermine* un mouvement ».

Nous dirons : « la force du point, la force qui correspond au « mouvement ».

§ 2. — *Propriétés de la force.*

119. Lorsqu'il s'agit du mouvement d'un point unique mobile à travers les repères, les propriétés de la force sont identiques à celles des secondes puissances : dans ce cas, en effet, la force ne diffère d'une seconde puissance que par le choix particulier de la variable t ; mais la loi dynamique (a) n'introduit aucun élément nouveau dans la question, puisque cette loi n'a de sens que pour deux points au moins en présence.

Nous nous bornerons donc à énoncer les théorèmes suivants relatifs aux forces d'un point :

Théorème. — La force d'un point est proportionnelle à la masse de ce point et à son accélération.

Ce théorème est une conséquence immédiate de la définition.

Théorème. — Dans le mouvement d'un point projeté sur une droite ou sur un plan, la force du point projeté est la projection de la force du point dans l'espace.

Théorème. — Dans un mouvement rectiligne, la force est toujours dirigée suivant la trajectoire.

Théorème. — La trajectoire d'un mobile et son mouvement sur cette trajectoire sont bien déterminés lorsqu'on se donne la position et la vitesse initiales du mobile pour une valeur particulière t_0 de t et les valeurs successives de la force pour une valeur quelconque de t.

Théorème. — Si v et v' sont les vitesses d'un mobile de masse m pour deux positions infiniment voisines M et M′, et j l'accélération en M, on a, dt étant la variation de t correspondante au déplacement MM′ :

$$mv' = mv + mj\,dt \quad \text{ou} \quad mv' = mv + f\,dt \qquad (1)$$

en désignant par f la force mj.

On a de même :

$$\mu(mv') = \mu(mv) + dt\,\mu(f) \qquad (2)$$

Dans la formule (1), f est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment mv; dans la formule (2), $\mu(f)$ est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment $\mu(mv)$.

Théorème. — Dans plusieurs mouvements simultanés, les mouvements d'entraînement étant supposés de translation, la force totale d'un point est la résultante de ses forces partielles.

Pour un déplacement fini quelconque du mobile, l'action de la force est égale à l'accroissement de l'énergie du mobile pendant le déplacement.

Théorème. — Lorsque, dans un mouvement plan, la force du mobile M passe par une direction fixe O, les aires décrites par le rayon vecteur OM sont proportionnelles aux variations de t.

La réciproque est vraie.

Tous ces théorèmes sont une conséquence de ceux démontrés précédemment pour les secondes puissances et pour les accélérations (96, 97, 98).

120. Lorsqu'il s'agit de plusieurs mobiles, les propriétés des forces sont encore celles des secondes puissances, mais avec les simplifications qui résultent de la loi dynamique.

Remarquons d'abord que, pour appliquer cette loi, il faut considérer uniquement les forces de la première catégorie (118), c'est-à-dire les forces prises par rapport au système particulier de repères adopté dans cette loi (a).

Nous insistons sur ce point qui paraît avoir échappé aux auteurs.

Soit dans un ensemble S de points dynamiques, un groupe particulier G pris séparément ; d'après la loi dynamique, deux points quelconques de G échangent des forces égales et contraires suivant la droite qui les joint ; ce sont les forces intérieures du groupe G ; les forces que ce groupe échange avec les autres points de S sont les forces extérieures.

121. Il résulte de là que les forces ainsi opposées deux à deux se détruisent dans la composition des forces et des moments des forces de tous les points du groupe G. Les théorèmes sur les secondes puissances se modifient alors de la façon suivante :

Théorème. — La force totale du centre de gravité du groupe

G est la résultante de translation de toutes les forces *extérieures* de ce groupe (101).

Théorème. — Si P et P′ sont les résultantes des premières puissances de tous les points du groupe G au commencement et à la fin de la variation très petite dt de t, on a, en désignant par R la résultante de translation des forces extérieures du groupe au commencement de dt (103) :

$$P' = P + R dt.$$

De plus, R est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité du segment P.

Théorème. — Si $p_1, p_2, p_3 \ldots$ et $p_1', p_2', p_3' \ldots$ sont les premières puissances de tous les points du groupe G au commencement et à la fin de la variation dt, on a, en désignant par $f_1, f_2, f_3 \ldots$ les forces *extérieures* du groupe à l'instant considéré (104) :

$$\mu(p_1' p_2' p_3' \ldots) = \mu(p_1 p_2 p_3 \ldots) + dt\,\mu(f_1 f_2 f_3 \ldots).$$

On reconnaît dans ces deux derniers théorèmes, sous une forme un peu différente, les théorèmes sur les quantités de mouvements projetés sur un axe et sur les moments de ces quantités de mouvements pris par rapport à un axe.

Théorème. — Quand les forces *extérieures* ont une résultante unique passant constamment par un point fixe O, l'axe des aires, en ce point, pour tous les mobiles du groupe G, a une direction fixe et il est proportionnel à t (108).

La réciproque est vraie.

En particulier, quand il n'y a pas de forces extérieures ou quand leur résultante est nulle, le théorème est vrai pour un point quelconque de l'espace.

A l'axe des aires de direction fixe correspond un plan du maximum des aires qui est également fixe.

Nous rappelons encore, en terminant, que tous ces théorèmes supposent le choix particulier de repères que suppose la loi dynamique elle-même.

122. Le théorème suivant, au contraire, ne dépend pas de la loi dynamique et par conséquent est vrai pour les deux catégories de forces (118).

Théorème. — Dans le groupe de mobiles G, l'accroissement

de l'énergie totale $\Sigma \frac{1}{2} mv^2$ est égal à l'action des forces des mobiles pour des déplacements simultanés de ces mobiles (109).

Mais ici il faut, bien entendu, prendre toutes les forces.

123. Reprenons les formules démontrées plus haut :

$$p_1' + p_2' + p_3' + \ldots = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots + dt(f_1 + f_2 + f_3 + \ldots) \quad (1)$$

$$\mu(p_1' p_2' p_3' \ldots) = \mu(p_1 p_2 p_3 \ldots) + dt\,\mu(f_1 f_2 f_3 \ldots) \quad (2)$$

et appliquons-les au cas où le système des points est un solide de forme invariable : il est facile de voir que le mouvement du solide est complètement déterminé quand on se donne pour une valeur quelconque de t la résultante de translation des forces extérieures $f_1, f_2, f_3 \ldots$ et leur moment par rapport à un point; remarquons d'ailleurs que dans ce cas le moment de ces forces est connu en un point quelconque.

La résultante $f_1 + f_2 + f_3 + \ldots$ est la force du centre de gravité du solide ; dès lors, connaissant cette force pour toutes les valeurs de t et les circonstances initiales du mouvement, le mouvement du centre de gravité est déterminé (119).

Voyons maintenant quel est le mouvement du solide autour de son centre de gravité et supposons les moments pris par rapport à ce point.

L'équation (2) exprime que le moment connu $\mu(f_1 f_2 \ldots)$ est la vitesse sur l'indicatrice que décrit l'extrémité A du segment $\mu(p_1 p_2 p_3 \ldots)$; si l'on se donne les conditions initiales du mouvement du solide, $\mu(p_1 p_2 p_3 \ldots)$ est déterminé pour la position initiale ; comme d'ailleurs $\mu(f_1 f_2 f_3 \ldots)$ est connu pour toutes les valeurs de t, il en résulte que la trajectoire du point A et son mouvement sur cette trajectoire sont déterminés (119), en d'autres termes, $\mu(p_1 p_2 p_3 \ldots)$ est déterminé en grandeur, direction et sens pour toutes les valeurs de t. Or, nous avons vu qu'en appelant I_x, I_y et I_z les moments d'inertie du solide par rapport aux trois axes principaux du centre de gravité, on avait (110) :

$$\omega_x I_x + \omega_y I_y + \omega_z I_z = \mu(p_1 p_2 p_3 \ldots) \quad (3)$$

ω_x, ω_y et ω_z étant les projections sur ces axes de la vitesse de rotation instantanée ω du solide. I_x, I_y, I_z étant des constantes, il en

résulte que ω est déterminé en grandeur, direction et sens pour chaque valeur de t.

Donc on connaît à chaque instant l'axe de rotation instantané du solide autour de son centre de gravité et la vitesse de cette rotation ; par conséquent, le mouvement du solide est déterminé ; de là ce théorème :

Théorème. — Le mouvement d'un solide est complètement déterminé lorsqu'on connaît les circonstances initiales de son mouvement et pour une valeur quelconque de t la résultante de translation et le moment de ses forces extérieures.

124. Si nous considérons comme équivalents deux systèmes de forces représentées par deux systèmes de segments équivalents, on voit que le mouvement d'un solide dépendant seulement des deux expressions :

$$f_1 + f_2 + \dots \quad \text{et} \quad \mu(f_1 f_2 \dots)$$

ce mouvement reste le même pour un second système de forces extérieures équivalant au premier.

125. Supposons que les forces extérieures f_1, f_2, f_3... aient une résultante unique passant par le centre de gravité ; dès lors on a, en prenant les moments par rapport à ce point $\mu(f_1 f_2 f_3 \dots) = 0$ et par suite, d'après l'équation (2) :

$$\mu(p_1 p_2 p_3 \dots) = k$$

k étant un segment constant en grandeur, direction et sens. On en déduit, d'après l'équation (3) :

$$\omega_x I_x + \omega_y I_y + \omega_z I_z = k.$$

Si, dans le mouvement du solide et pour une valeur particulière de t, l'axe de rotation instantanée coïncide avec l'axe principal d'inertie I_z, on a pour cette valeur de t, $\omega_x = 0$, $\omega_y = 0$ et $\omega_z = \omega$; il vient donc :

$$\omega I_z = k \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{k}{I_z}.$$

Donc ω restera égal en grandeur, direction et signe à $\frac{k}{I_z}$. De là ce théorème :

Théorème. — Lorsque, dans un solide, les forces extérieures ont une résultante unique passant par son centre de gravité et que le

mouvement initial est une rotation instantanée autour d'un des axes principaux d'inertie de son centre de gravité, ce mouvement de rotation continue autour du même axe et avec la même vitesse. C'est-à-dire que l'angle de rotation est proportionnel à la variable t.

126. Nous avons insisté un peu sur ce théorème, parce qu'il a joué un rôle considérable dans l'histoire de l'astronomie et de la mécanique.

Supposons qu'ayant fait à un point de vue purement géométrique l'étude de la dynamique, comme nous le faisons ici, nous voulions chercher si les mouvements dans l'univers satisfont bien à la loi dynamique (a) ; la question se poserait ainsi :

« Existe-t-il dans l'univers un système de repères et une va-
« riable principale t pour lesquels tous les mouvements vérifient
« la loi dynamique (a) ? »

Or, si l'on prend le système des étoiles fixes comme repères, on constate que tous les corps célestes tournent simultanément d'angles proportionnels ; c'est qu'en effet ces corps se trouvent dans les mêmes conditions que le solide dont nous venons de parler : par suite, l'angle de leur rotation est proportionnel à la variable t : c'est pourquoi, en particulier, l'angle de la rotation terrestre nous a donné cette variable spéciale, unique dans l'univers.

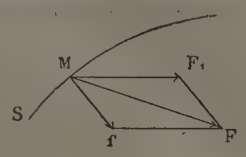
Mais, ainsi que nous l'avons montré, le choix de cette variable unique a été fait en dehors de toute considération théorique ; l'homme fut amené tout naturellement à compter le temps par des nombres de jours ; de là à mesurer le temps par la rotation de la terre ou, ce qui revient au même, par la rotation apparente de la sphère céleste, il n'y avait qu'un pas.

Il n'y a donc pas lieu de s'étonner que l'on ait adopté cette mesure du temps, mais par suite du théorème remarquable que nous venons de rappeler, cette mesure du temps par la rotation terrestre s'est précisément trouvée être la seule pour laquelle la loi dynamique (a) fût vérifiée : autrement Kepler et Newton n'auraient pas pu trouver les lois des mouvements célestes.

Il y a donc eu là pour la science un hasard exceptionnellement heureux sans lequel la conception mécanique réalisée dans l'univers serait probablement encore à trouver.

127. Nous allons indiquer succinctement comment doit être traitée la théorie des forces de liaison au point de vue géométrique que nous avons adopté : nous nous bornerons à citer quelques exemples.

Soit un mobile M décrivant une trajectoire plane S ; décomposons la force totale F en deux autres F_1 et f, cette dernière étant normale à la courbe. Il est facile de voir que le mouvement du mobile sur sa trajectoire est déterminé quand on se donne : 1° cette trajectoire ; 2° la force partielle F_1 pour chaque point de la trajectoire.



En effet, l'action de F est la somme des actions de f et de F_1 (74) ; or f est normal à la trajectoire et par suite donne une action nulle ; reste l'action de F_1 qui est connue, puisque F_1 est déterminé pour chaque position de M.

Mais cette action est égale à l'accroissement de l'énergie $\frac{1}{2}mv^2$; il en résulte que, si l'on connaît la vitesse initiale du mobile, la vitesse v en une position quelconque de ce mobile résulte de la connaissance de $\frac{1}{2}mv^2$ et par suite de F_1. On peut ainsi construire l'indicatrice de v et la tangente à cette indicatrice donne précisément la direction de l'accélération g du mobile ou, ce qui revient au même, de F ; dès lors, le parallélogramme de composition de F_1 et f est déterminé et F s'en déduit. Connaissant ainsi la force totale du mobile, on a tous les éléments du mouvement.

En résumé, dans cette question, au lieu de se donner la force totale F qui, avec les conditions initiales du mouvement, donnerait la trajectoire et la loi du mouvement, on se donne la trajectoire et la force partielle F_1, la seconde force partielle f étant supposée normale à la trajectoire ; la force f correspond donc à cette condition géométrique imposée au mobile de parcourir la trajectoire déterminée S : cette force f, qui équivaut à une condition géométrique ou, comme on dit, à une *liaison*, nous l'appellerons *force de liaison*.

Le problème que nous venons de traiter peut s'énoncer ainsi : Un mobile est astreint à parcourir une courbe donnée ; on se donne à chaque instant la force de ce mobile, abstraction faite de la force de liaison ; trouver la loi du mouvement.

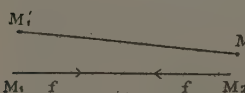
Les considérations précédentes nous ont permis de construire le parallélogramme de composition des forces F_1 et f, ce qui nous donne la force totale et la force de liaison ; le problème est ainsi résolu.

128. On peut aussi astreindre un point à rester sur une surface fixe ; cette question se résout d'une façon analogue : la force de liaison est normale à cette surface.

Si, au lieu de décrire une ligne ou une surface, le point est astreint à rester immobile, cela ne peut se faire que si sa force totale F est nulle et comme F est supposée être la résultante de la force partielle F_1 connue et d'une force de liaison f non déterminée, on doit avoir :

$$F_1 + f = 0$$

129. — Nous citerons encore le cas des solides invariables où deux points quelconques sont astreints à conserver leur distance : soient M_1 et M_2 ces deux points ; ils échangent deux forces égales et contraires f qui sont deux forces intérieures ; les deux points ont de plus des forces extérieures, et pour chacun d'eux la force totale est la résultante de la force extérieure et de la force intérieure f.



Prenons les points M_1, M_2 dans les positions voisines M_1', M_2' ; il est évident que, toutes les autres conditions du mouvement restant les mêmes, la distance $M_1' M_2'$ dépend uniquement de f ; par suite, pour une valeur déterminée de f, la distance M_1', M_2' sera la même que la distance $M_1 M_2$; f, ainsi défini, est la force de liaison qui correspond à la condition géométrique imposée aux points M_1, M_2 de rester à une distance fixe.

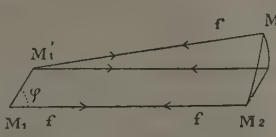
130. Nous nous bornerons aux forces de liaison que nous venons de définir en remarquant que dans chaque cas la force de liaison doit être définie, car la décomposition de la force totale F d'un point entre une composante F_1 et une force de liaison f est évidemment possible de bien des manières.

La propriété importante des forces de liaison consiste en ce que leur action pour un déplacement quelconque du mobile est toujours nulle. Cela est évident quand le mobile est astreint à rester sur une courbe ou une surface, car la force de liaison est alors normale à la trajectoire.

Il en est de même quand le point est astreint à rester fixe, puisqu'alors le déplacement est nul.

Voyons maintenant le cas de deux points M_1 et M_2 astreints à conserver leur distance : prenons une position infiniment voisine $M_1'M_2'$ de la droite M_1M_2

Ce déplacement de la droite M_1M_2 peut s'obtenir par une translation qui amène M_1M_2 en $M_1'N_2$, puis par une rotation autour de M_1' amenant $M_1'N_2$ en $M_1'M_2'$: si f est la force de liaison, l'action de f pour le déplacement total de M_1 est $f \times M_1M_1' \cos\varphi$; l'action de f pour le déplacement total de M_2 est la somme des actions pour les déplacements partiels M_2N_2 et N_2M_2' ; pour le déplacement M_2N_2, cette action est évidemment $-f M_1M_1 \cos\varphi$: quant au déplacement N_2M_2', il est normal à f et par conséquent son action est nulle : donc finalement la somme des actions pour les déplacements totaux des deux points est $f \times M_1M_1' \cos\varphi - f \times M_1M_1' \cos\varphi$ ou o.



De là ce théorème :

Théorème. — Dans un système de points où il y a des liaisons, l'accroissement de l'énergie est égal à la somme des actions de toutes les forces, sauf les forces de liaison.

Dans un solide de forme invariable notamment, on pourra négliger l'action des forces intérieures qui sont des forces de liaison ; donc :

Théorème. — L'accroissement de l'énergie dans un solide est égal à la somme des actions des forces extérieures.

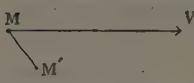
Un système de points est dit à liaisons complètes quand les liaisons imposent à chaque point une trajectoire unique ; tel est, par exemple, le cas d'un solide dont deux points sont fixes.

§ 3. — *Équilibre.*

131. Un point est en équilibre lorsque ses forces partielles sont telles qu'il resterait en repos s'il y était tout d'abord ; cette définition s'étend à un nombre quelconque de points. Lorsque l'on considère les forces de points en équilibre, on dit que ces forces sont en équilibre : remarquons bien que ces définitions de l'équilibre sont indépendantes des conditions initiales du mouvement ; ainsi des forces peuvent refaire équilibre sur un point en mouvement ; il suffit pour cela que ce point ait à l'origine une certaine vitesse.

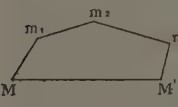
La théorie de l'équilibre repose, comme on sait, sur le principe fondamental des déplacements *virtuels :* nous appelons l'attention sur ce mot virtuel qui ne nous semble pas bien compris.

Un déplacement virtuel, dit-on, est un déplacement fictif du mobile ne correspondant pas à la force réelle de ce mobile :



ainsi, par exemple, si pour la position M du mobile la vitesse est MV, le déplacement réel se fera suivant MV ; tout autre déplacement MM′ dans une autre direction sera un déplacement virtuel ; l'action de la force réelle pour ce déplacement virtuel est dite action virtuelle.

Cela posé, soit MM′ le déplacement total infiniment petit d'un mobile ; on peut toujours considérer ce déplacement total comme résultant de plusieurs déplacements partiels Mm_1, m_1m_2, m_2m_3, etc.... ; on conçoit même ces déplacements partiels avec un déplacement total nul, c'est-à-dire dans le cas où le mobile est au repos. Si F est la force totale de M, chaque déplacement partiel donne lieu à une action partielle pour cette force F ; or, il est évident que ce déplacement partiel ne diffère en rien d'un déplacement virtuel, car c'est un déplacement qui ne correspond pas à la force réelle F, puisque le déplacement réel est MM′ ; de même, l'action de F pour ce déplacement partiel est une action virtuelle.



De même, tout déplacement virtuel peut toujours être considéré

comme une composante du déplacement réel : il résulte de là que le mot virtuel ne correspond à aucune idée nouvelle ; nous le remplacerons donc dans ce qui suit par le mot partiel qui lui est équivalent : il est clair que c'est une faute de logique que d'introduire un mot nouveau pour une notion déjà définie.

On peut aussi considérer un déplacement virtuel comme un déplacement du mobile par rapport à un nouveau système de repères ; mais ce point de vue ne diffère pas du précédent, les déplacements partiels se rattachant précisément à la théorie des mouvements simultanés.

132. Un point est évidemment en équilibre quand sa force totale est nulle : dès lors l'action de cette force pour un déplacement partiel infiniment petit quelconque du point est nulle. De là ce théorème très connu :

Théorème. — Pour qu'un point soit en équilibre, il faut et il suffit que la somme des actions de toutes ses forces pour un déplacement partiel infiniment petit quelconque soit nulle.

Ces forces se font alors équilibre sur le point en question.

Lorsqu'il y a des forces de liaison et que l'on prend des déplacements partiels satisfaisant à la condition géométrique que représente la liaison, il n'y a pas à en tenir compte dans l'équilibre, puisqu'alors les actions de ces forces de liaison sont nulles (130).

On déduit aisément de là qu'un point est en équilibre sur une courbe quand la résultante de ses forces, abstraction faite de la force de liaison, est normale à la courbe.

133. On passe de là à un système quelconque de points et l'on obtient le théorème suivant dont nous ne rappelons pas la démonstration bien connue :

Théorème. — Pour qu'un système de points soit en équilibre, il faut et il suffit que, pour des déplacements partiels infiniment petits quelconques de tous les points, la somme des actions de toutes les forces soit toujours nulle.

Dans le cas où il y a des liaisons, ce théorème se transforme comme il suit :

Théorème. — Pour qu'un système de points où il y a des liaisons soit en équilibre, il faut et il suffit que, pour des déplacements infiniment petits compatibles avec les liaisons, la somme

des actions de toutes les forces, abstraction faite des forces de liaison, soit toujours nulle.

Nous savons en effet qu'alors les forces de liaison donnent des actions nulles.

134. Appliquons ceci à un solide ; les forces de liaison sont alors les forces intérieures (130) et un mouvement infiniment petit compatible avec les liaisons est un mouvement hélicoïdal ou encore la combinaison de deux rotations simultanées (65).

L'action des forces extérieures, les seules dont il y ait lieu de tenir compte, est pour le déplacement total la somme des actions pour les deux rotations partielles : soit donc une rotation infiniment petite d'angle $d\varphi$ autour d'un premier axe OZ ; l'action d'une force f_1 pour ce déplacement est (75) $\mu_z(f_1)d\varphi$ et la somme des actions de toutes les forces extérieures f_1, f_2, f_3 ... est $\mu_z(f_1 f_2 \ldots)\, d\varphi$.

Pour une seconde rotation d'angle $d\varphi_1$ autour de l'axe O_1Z_1, la somme de ces actions est $\mu_{z_1}(f_1 f_2 \ldots)d\varphi_1$; la condition d'équilibre est par suite $\mu_z(f_1, f_2 \ldots)d\varphi + \mu_{z_1}(f_1, f_2, f_3 \ldots)d\varphi_1 = 0$.

Cette condition devant être remplie quels que soient $d\varphi$ et $d\varphi_1$ et les axes de rotation, elle exprime que le moment des forces extérieures par rapport à une droite quelconque doit être nul.

Deux systèmes de forces équivalents, c'est-à-dire représentés par deux systèmes de segments équivalents, ont même moment par rapport à une droite : il en résulte que si un système de forces se fait équilibre sur un solide, il en sera de même de tout autre système de forces équivalent, ce qui du reste résulte d'un théorème déjà démontré (124).

Remplaçons donc le système de forces primitif par le système équivalent composé de la résultante R et du couple C : il faut, pour l'équilibre, que le moment de R et de C par rapport à une droite quelconque ou, ce qui revient au même, par rapport à un point quelconque soit nul. Prenons les moments par rapport à un point de R, le moment du système se réduit alors au moment du couple ; donc le moment du couple est nul ; prenons alors le moment par rapport à un point extérieur à R, le moment du système se réduira alors au moment de R, ce moment devant être nul, on aura $R = 0$.

Ainsi les conditions d'équilibre sont que le système des forces extérieures équivaille à une résultante et à un couple nuls.

135. Si le solide a un point fixe ou deux points fixes, les conditions d'équilibre sont données par les deux théorèmes suivants.

Théorème. — Pour qu'un solide ayant un point fixe o soit en équilibre, il faut et il suffit que le moment des forces extérieures par rapport à ce point soit nul.

Théorème. — Pour qu'un solide ayant deux points fixes o et o_1 soit en équilibre, il faut et il suffit que le moment des forces extérieures par rapport à la droite oo_1 soit nul.

Il faut, bien entendu, dans ces théorèmes, laisser de côté les forces de liaison relatives aux points supposés fixes.

136. Supposons que dans un système de points en mouvement, à liaison ou non, les forces f autres que les forces de liaison se fassent constamment équilibre : la somme des actions des forces f est nulle pour des déplacements partiels quelconques infiniment petits (133) et en particulier pour les déplacements totaux, c'est-à-dire réels de ces points.

Mais pour ces déplacements totaux la somme des actions des forces f est égale à l'accroissement d'énergie (130) ; par suite, dans un pareil système l'énergie est constante.

La réciproque est vraie quand le système est à liaisons complètes ; si en effet dans ce cas l'énergie est constante, l'accroissement d'énergie et, par suite, la somme des actions de f pour les déplacements infiniment petits des points sont nuls ; or, c'est précisément la condition nécessaire pour l'équilibre des forces f, puisque le système étant à liaisons complètes, les déplacements considérés sont les seuls compatibles avec les liaisons (130).

§ 4. — *Systèmes dynamiques quelconques. Conclusions.*

137. Nous rappelons la définition géométrique que nous avons donnée de la dynamique (116).

La dynamique géométrique est l'étude des mouvements des points doués de masses dont les accélérations prises par rapport à un système de repères et à une variable principale t convenablement choisis satisfont à la loi dynamique (a).

Nous rappelons enfin que les masses sont simplement des coefficients numériques fixes attribués aux points et que la loi dynamique (a) s'énonce comme il suit :

Les repères et la variable t étant convenablement choisis, deux points quelconques M et M_1 échangent des accélérations inversement proportionnelles à leurs masses et dirigées suivant la droite MM_1.

Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, les masses peuvent être des nombres algébriques, c'est-à-dire avoir les deux sens.

La dynamique géométrique ainsi définie est bien une science purement mathématique, mais elle a de plus cet intérêt particulier qu'elle se trouve réalisée dans l'univers, sinon d'une façon absolue, au moins d'une façon très approchée, tellement approchée que les écarts entre la théorie et l'observation sont insignifiants.

Mais, au seul point de vue mathématique, la loi dynamique (a) n'est qu'une loi particulière à côté de laquelle nous pouvons en concevoir bien d'autres : de là une dynamique beaucoup plus générale que celle que nous venons d'exposer, mais qui s'en sépare nettement en ce sens qu'elle est, au moins pour le moment, sans application dans l'univers.

138. Nous disons pour le moment ; c'est là une expression qui demande à être expliquée : nous ne voulons pas dire, en effet, que la loi dynamique (a) avec ses conséquences, la loi de Newton, etc..., réalisée aujourd'hui dans l'univers, cessera de l'être demain ; quelle que soit l'opinion philosophique ou religieuse qu'on ait sur le mode d'organisation de l'univers, tout le monde reconnaît aujourd'hui que cet univers fonctionne scientifiquement et suivant une loi, nous pourrions même dire une sorte de volonté générale et immuable que des volontés particulières, des hasards ne sauraient interrompre.

Mais cette loi générale peut toujours être considérée comme une série à termes indéfiniment décroissants : nous connaissons aujourd'hui le premier terme de la série, c'est la loi dynamique (a) ; mais rien ne dit que des siècles d'observation, s'ils sont donnés à l'homme, ou simplement même l'emploi de procédés et d'instruments plus précis que les nôtres ne nous donneront pas pour

cette loi (a) un terme de correction infiniment petit ; c'est dans ce sens que nous disons que la loi (a) est, pour le moment, la loi de l'univers et qu'il ne faut pas la considérer comme l'expression absolue et définitive de la réalité.

Remarquons, de plus, que nous sommes loin de connaître tous les mouvements de la matière ; nous ne sommes donc pas certains que tous les mouvements satisfont à cette loi (a) ; cette observation concerne surtout les mouvements des points infiniment voisins, comme ceux qui se produisent dans les réactions chimiques, dans la formation des cristaux, dans l'organisation de la cellule ; peut-être ces mouvements ont-ils une dynamique spéciale différente de celle qu'on a étudiée jusqu'ici ; ce sont là, bien entendu, de pures hypothèses spéculatives, mais il est clair que, quand bien même elles se trouveraient réalisées, elles ne seraient qu'une application nouvelle de notre dynamique générale.

139. Pour donner plus de précision à cette idée d'une dynamique générale, nous indiquerons quelques exemples.

Voici d'abord comment nous la définirons :

La dynamique est l'étude du mouvement des points doués de masses, étant entendu que tous ces mouvements satisfont à une loi générale laquelle exprime une relation entre les masses et les vitesses d'ordre quelconque des points, cela pour un choix convenable des repères et de la variable t.

C'est cette loi générale qui distingue la dynamique de la cinématique.

La loi qui se rapproche le plus de la loi dynamique (a) est la suivante :

Deux points quelconques M et M_1 échangent des vitesses d'ordre n inversement proportionnelles à leurs masses et dirigées suivant la droite MM_1.

Pour $n = 2$, on rentre dans le cas de la loi (a).

Ce système dynamique, que nous désignerons pour la commodité du langage par la lettre (b), a beaucoup d'analogies avec le système (a) ; les puissances d'ordre n y jouent le rôle des forces ; le système (b) nous donne notamment des puissances d'ordre n *intérieures* (ce mot s'explique de lui-même) deux à deux égales

et opposées, et ces puissances intérieures disparaissent lorsque l'on compose toutes les puissances d'ordre n ou lorsque l'on prend leurs moments : de là, par exemple, ce théorème (121) :

Théorème. — La puissance d'ordre n du centre de gravité est la résultante de translation de toutes les puissances d'ordre n du système, les puissances intérieures exceptées.

Nous dirons dans ce système qu'un point est en équilibre quand sa puissance totale d'ordre n est nulle ; avec cette définition, le théorème relatif aux déplacements partiels infiniment petits dans le cas de l'équilibre (132) est applicable.

Quant aux différences qui existent entre les systèmes a et b, elles proviennent surtout du théorème des aires et du théorème sur l'action de la seconde vitesse ; ces théorèmes ne peuvent en effet s'étendre tels quels aux vitesses de tous ordres.

140. Nous citerons encore une loi dynamique qui présente quelques particularités intéressantes.

Les puissances d'ordre n de deux points quelconques forment un couple.

Dans ce système, le théorème relatif à la puissance d'ordre n du centre de gravité est encore vrai, car les puissances d'ordre n *intérieures* formant couple deux à deux s'annulent dans la composition.

Nous ne développerons pas davantage ces considérations sur la dynamique générale, notre but étant simplement de montrer comment cette étude purement *géométrique* du mouvement nous conduit à une science beaucoup plus vaste que celle qui est connue actuellement.

141. En résumé, ce qu'il faut retenir de cette conception, c'est qu'il existe une mécanique rigoureusement rationnelle, véritable géométrie du mouvement qui subsisterait dans toutes ses conséquences quand bien même l'univers cesserait d'exister ou existerait autrement.

L'univers n'est qu'une application particulière et très limitée de cette mécanique qui ne dépend en rien des faits observés et nous aide au contraire à les prévoir et à les expliquer.

LA

CLASSIFICATION DES NUAGES

DE POËY

Par M. C. MILLOT

ANCIEN OFFICIER DE MARINE, CHARGÉ D'UN COURS COMPLÉMENTAIRE DE MÉTÉOROLOGIE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

La forme des nues, qui donne aux paysages tant de mouvement et de charme, nous annonce ce qui se passe dans les hautes régions de l'atmosphère ; quand l'air est calme, les nuages dessinent sur le ciel d'une chaude journée d'été « l'image projetée » du sol dont le calorique rayonne abondamment vers l'espace.

HUMBOLDT.

Je me suis proposé de vous parler de la nomenclature des nuages imaginée par le météorologiste français André Poëy, ancien fondateur et directeur de l'observatoire physique et météorologique de la Havane, et vivant actuellement à Paris.

Voici les motifs qui m'ont engagé à traiter ce sujet devant vous.

Bien que sa première publication remonte à l'année 1872[1], bien qu'elle constitue un progrès important sur la classification d'Howard reconnue insuffisante, et qu'elle ait été accueillie avec faveur par la plupart des météorologistes, la nouvelle méthode de Poëy ne semble pas avoir reçu la publicité qu'elle mérite, puisque, dans tous les traités de physique et même, chose curieuse, dans la presque totalité des ouvrages de météorologie parus en France depuis cette époque, on n'y fait pas la plus petite allusion.

On reproduit toujours la nomenclature surannée de l'anglais Howard, qui remonte au commencement du siècle, accompagnée

1. Une troisième édition a paru en 1879 chez Gauthier-Villars, sous le titre : *Comment on observe les nuages pour prévoir le temps.*

la petite image que vous connaissez tous et qui représente, dans un même ciel, le *cirrus*, le *cumulus*, le *stratus* et le *nimbus*, avec des oiseaux renvoyant au texte. De sorte que la classification française, quoique plus rationnelle, reste à peu près ignorée. J'ai voulu, dans la limite de mes faibles moyens, contribuer à la faire connaître.

Tandis qu'Howard ne s'est guère occupé que de la *forme* des nuages, Poëy a eu surtout en vue leur *structure*, qui dépend de la température, de l'altitude et du mode de précipitation de la vapeur d'eau. La structure des nuages nous est révélée surtout par les phénomènes lumineux auxquels ils donnent naissance.

Si la nomenclature d'Howard n'est pas absolument mauvaise, si elle conserve encore quelque valeur, cela tient à ce que la forme d'un nuage dépend, dans une certaine mesure, de sa structure, ainsi que l'a bien fait voir le météorologiste français.

Howard n'a presque rien dit de l'*évolution* des nuages ; Poëy, au contraire, a établi leur *filiation*, c'est-à-dire comment et dans quel ordre les nuages passent d'une forme à une autre.

Pour mieux faire voir la supériorité de la méthode nouvelle, nous allons mettre en regard les deux classifications :

Nomenclature d'Howard.

Premier type : *Cirrus.*
Dérivés. *Cirro-cumulus.*
Cirro-stratus.
Deuxième type : *Cumulus.*
Dérivé : *Cumulo-stratus.*
Troisième type : *Stratus.*
Quatrième type : *Nimbus.*

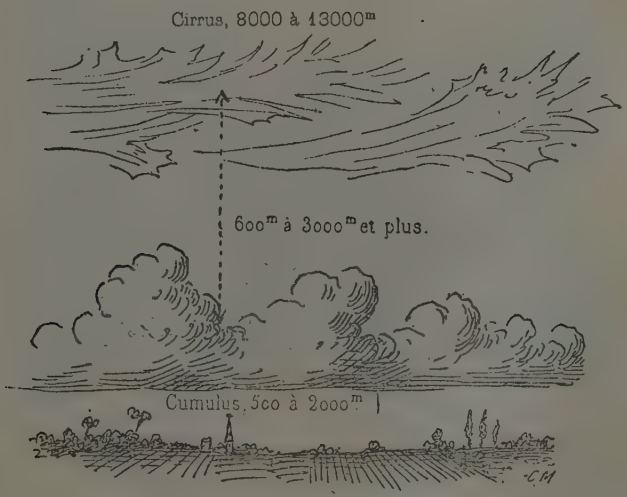
Classification de Poëy.

Premier type : *Cirrus* } nuages de glace.
Dérivés. *Tracto-cirrus* } nuages de glace.
Cirro-stratus } nuages de glace.
Cirro-cumulus } nuages de neige.
Pallio-cirrus } nuages de neige.
Globo-cirrus } nuages de neige.
Deuxième type : *Cumulus* } nuages de vapeur aqueuse.
Pallio-cumulus } nuages de vapeur aqueuse.
Globo-cumulus } nuages de vapeur aqueuse.
Fracto-cumulus } nuages de vapeur aqueuse.

Dans cette énumération, les nuages sont disposés dans l'ordre de leur altitude, et c'est dans cet ordre que les nuages de chaque type se transforment.

On voit de suite que Poëy a réduit ses types fondamentaux à deux : le type *cirrus* et le type *cumulus*.

Suivant les météorologistes qui se sont le plus occupés des nuages, ceux-ci se répartissent en deux couches superposées, qui peuvent ou non coexister, et il y a toujours un espace exempt de matière nébuleuse même entre les plus élevés des nuages inférieurs (type *cumulus*) et les plus bas des nuages supérieurs (type *cirrus*). On assigne comme distance de l'une à l'autre des deux couches en regard une hauteur qui varie de 600 à 3,000 mètres et plus.



Couches de nuages superposées.

Cet intervalle entre les deux systèmes de stratification nuageuse est fréquemment le théâtre d'un échange actif : ou bien une évaporation puissante a lieu à la face supérieure de la couche de cumulus, et la vapeur, invisible d'abord, vient se congeler dans les hautes régions pour donner naissance à des cirrus ; ou bien, et c'est ce qui a lieu le plus souvent, les particules glacées des couches élevées viennent faire irruption dans les régions infé-

rieures et y occasionner de violentes et abondantes condensations. Cette irruption est fréquemment visible à l'horizon par les temps orageux : c'est elle qui donne naissance aux nuages en forme d'enclume, superposés aux cumulus, et qui ont reçu du commandant Rozet le nom de *trombes internubaires*. Seulement cet auteur s'est trompé en faisant de ces nuées le produit de l'évaporation du sommet des cumulus ; bien au contraire, les nuages inférieurs doivent souvent leur existence à l'arrivée de la trombe glacée dans une couche voisine de la saturation.

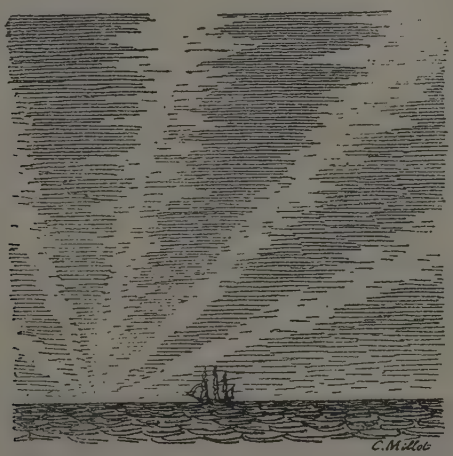
Trombe internubaire.

Ainsi, voilà déjà un fait fondamental — l'existence de deux couches distinctes correspondant à deux types principaux — qui a échappé à Howard et que Poëy a bien établi.

Pour être complet, je devrais décrire l'une après l'autre chacune des formes de nuages distinguées par Poëy ; mais, pour ne pas abuser de votre attention, j'examinerai seulement les innovations de l'auteur.

Il a donné le nom de *tracto-cirrus*, c'est-à-dire bandes de cirrus, à ceux de ces nuages qui se disposent en longues traînées parallèles que la perspective rend convergentes vers un point de l'ho-

rizon; ce sont les nuages les plus élevés après les légères balayures qui constituent les cirrus proprement dits. Les marins ont remarqué depuis longtemps ces bandes de nuages disposées en éventail et leur ont donné le nom de *pied de vent*, parce qu'elles annoncent, en général, un vent qui soufflera du point de l'horizon d'où semblent émaner les *tracto-cirrus*.



Tracto-cirrus.

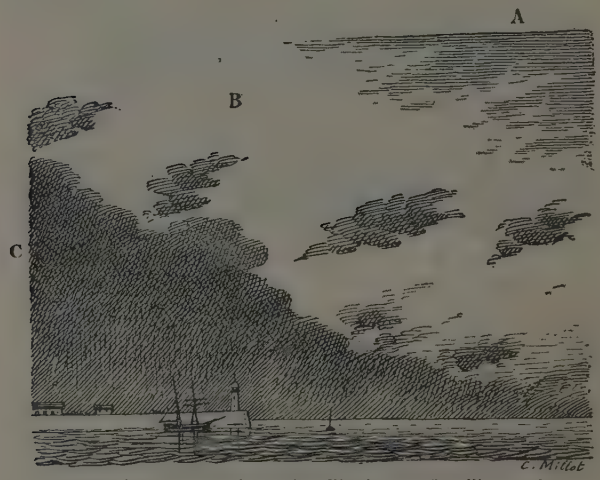
Humboldt a vu quelquefois, en plein jour, les bandes de cirrus s'orienter parallèlement à l'aiguille de déclinaison et affoler les boussoles comme le fait une aurore boréale. Dans ce cas, ce n'est plus le vent qui disposerait en bandes parallèles les nuages de glace, mais une action électrique. Malgré l'autorité d'Humboldt, il serait intéressant de voir cette remarque confirmée, car aucun voyageur, à ma connaissance, n'a fait cette observation après lui.

Vous remarquerez ensuite, qu'à l'inverse d'Howard, Poëy place les *cirro-stratus* au-dessus des *cirro-cumulus*, ce qui est naturel, puisqu'il fait de ceux-là des nuages de cristaux de glace et de ceux-ci des nuages de flocons de neige.

Nous arrivons maintenant à la création la plus heureuse de Poëy; je veux parler de son *pallium*. En voici la description empruntée à l'auteur lui-même.

Sous le nom générique de *pallium* (manteau), Poëy désigne deux formations nuageuses qui présentent l'apparence d'un voile, d'un rideau, d'une étendue considérable, d'une contexture très serrée, aux bords le plus souvent bien tranchés, d'une marche assez lente et qui embrassent une étendue de la voûte céleste plus grande que la portion visible du ciel. Selon que le pallium est formé de cirrus ou de cumulus, il se distingue en *pallio-cirrus* ou en *pallio-cumulus*. L'apparition de ces couches amène le mauvais temps, leur disparition le beau temps. La couche du *pallio-cirrus* apparaît la première et, quelques heures après, celle du *pallio-cumulus* se forme en dessous. Ces deux couches restent en vue à une certaine distance l'une de l'autre pendant toute la durée du mauvais temps ; leur action ou leur réaction réciproques produisent les orages et les fortes pluies.

Le *pallio-cirrus,* qui apparaît le premier, se forme par l'agglomération des cirro-cumulus qui s'abaissent visiblement. Il couvre le ciel d'une teinte uniforme blanc de perle ou laiteuse ; il monte



A, portion de ciel encore bleu. — B, pallio-cirrus. — C, pallio-cumulus.

généralement de l'horizon du S.-O., pour envahir peu à peu tout le ciel, et détermine la chute de la pluie tant qu'il reste au-dessus et en regard du *pallio-cumulus* des couches inférieures. Aussi

n'aperçoit-on le pallio-cirrus que sur l'avant et sur l'arrière de la dépression barométrique qui accompagne la présence des deux palliums au-dessus de l'horizon. Suivant toutes les apparences, c'est là le plus bas des nuages qui appartiennent aux couches supérieures de l'air et, pour cette raison, il est vraisemblablement formé de flocons de neige. Ceux-ci étant précipités par masses considérables sur les couches du pallium inférieur y déterminent une condensation plus rapide.

En résumé, on voit habituellement les avant-coureurs d'une dépression barométrique s'avancer dans le ciel à partir d'un point situé au Sud-Ouest et dans l'ordre suivant ou à peu près.

D'abord ce sont des cirrus proprement dits, sous forme de filaments déliés, épars ; puis des nuages stratifiés (*cirro-stratus*) qui parfois se rassemblent et forment un voile mince et demi-transparent, puis vient le ciel pommelé (*cirro-cumulus*) ; enfin les intervalles entre les pelottes du ciel pommelé se comblent et un rideau nuageux (*pallio-cirrus*) s'étend sur tout le ciel. Cette couche uniforme, blanche au début et que le soleil arrive à peine à percer, devient grisâtre à mesure qu'elle se dérobe aux rayons solaires.

Pendant ce temps, de petits nuages fuyards (en anglais *scuds*) commencent à se former dans les couches inférieures : c'est l'avant-garde du manteau de nuages pluvieux (*pallio-cumulus*), qui s'avance à son tour du même point de l'horizon pour envahir tout le ciel.

L'apparition des premiers cirrus a lieu souvent plusieurs jours avant le mauvais temps ; en moyenne 40 heures avant que le rideau de nuages de pluie (*pallium inférieur*) commence à poindre sur l'horizon, où il affecte la forme d'un banc nuageux (*panne* des marins français), et d'où il s'étend avec lenteur sur la totalité du ciel visible.

D'autres fois, quand la pression barométrique diminue avec rapidité, les différentes couches de nuages se suivent de si près, que les premiers éclaireurs n'ont pas encore franchi le zénith qu'on voit déjà le sombre banc de nuages se dessiner nettement à la partie occidentale de l'horizon.

Aux yeux de Poëy, une propriété autre que l'altitude et la structure distingue encore les nuages du type *cirrus* de ceux du type

cumulus : les premiers nous arrivent tout formés par les régions supérieures et nous annoncent ainsi la venue du courant marin de Sud-Ouest; ce sont le plus souvent des formations marines et tropicales venues sur les ailes du contre-alizé. Les seconds, au contraire, sont une formation toute locale, ou du moins ne voyagent guère; voici comment on peut concevoir la formation du *pallio-cumulus,* qui se ferait alors de proche en proche.

Quand les cirrus s'épaississent et descendent, ils refroidissent l'air situé en dessous, à la fois parce qu'ils affaiblissent les rayons du soleil et parce qu'ils sont formés de glace. Ce refroidissement fait naître des nuages dans les couches inférieures voisines de leur point de saturation. Quand les cirrus, devenant nombreux et épais, finissent par former un *pallio-cirrus,* les nuages inférieurs augmentent et s'amassent à leur tour sous la forme d'une couche compacte et continue qui, privée des rayons du soleil, prend une teinte gris sombre : c'est le *pallio-cumulus* ou couche continue de nuages noirs pluvieux, d'où la pluie tombe abondamment, surtout si l'air froid ou la neige des régions élevées viennent à descendre jusqu'à lui.

Plus bas encore, on voit souvent courir avec rapidité de petits nuages peu denses et de forme échevelée, étirée, qui se détachent en plus clair sur le rideau noir de la couche pluvieuse. Poëy leur donne le nom de *fracto-cumulus;* ce sont essentiellement des nuages de vent et, dans les tempêtes, ils accompagnent les rafales ou renforcements momentanés de la brise. Ce sont eux que l'on voit passer quelquefois si près de terre qu'ils rasent le sommet des édifices élevés et des arbres.

Tout ce qui précède montre bien l'inanité du *nimbus* d'Howard : ce n'est la propriété d'aucun nuage isolé de laisser tomber de la pluie et, tant qu'ils n'ont pas de cirrus au-dessus d'eux, les cumulus en apparence les plus menaçants ne peuvent fournir une ondée de quelque importance. Aussi Poëy n'admet-il pas le *nimbus* tel qu'on le définit d'après le météorologiste anglais : « un nuage noir d'où la pluie tombe à torrents. »

Quant au *globo-cirrus,* ou nuage globulaire tempêtueux, c'est une forme très rare, qu'Howard ne mentionne pas, mais dont le naturaliste français Lamarck, auteur d'une nomenclature des

nuages antérieure à celle d'Howard, avait déjà donné la description sous le nom de « nuage boursouflé ». Poëy l'adopte et lui donne le nom latin ci-dessus. Figurez-vous une masse blanche, arrondie, d'une apparence tellement dense qu'elle ressemble à une boule de neige ou une agglomération de boules, formant une nuée parfaitement isolée et à contours nettement arrêtés. Ces nuages, qui ont reçu des marins anglais le nom de *pocky-clouds* (nuages à poches) et qu'on trouve désignés dans les *Instructions de l'Amirauté britannique* sous le nom de *roll-cumulus,* accompagnent de terribles bouffées de vent, de courte durée, mais d'une violence inouïe. Cette forme est rare dans les nuages du type cirrus; elle se rencontre plus fréquemment dans les couches inférieures et reçoit alors le nom de *globo-cumulus.* Dans ce cas, les poches hémisphériques, de couleur sombre, sont adhérentes au pallium pluvieux et en relief sur sa face inférieure. J'ai signalé la présence de ce météore dans la tempête orageuse du 19 décembre 1884 à Nancy[1].

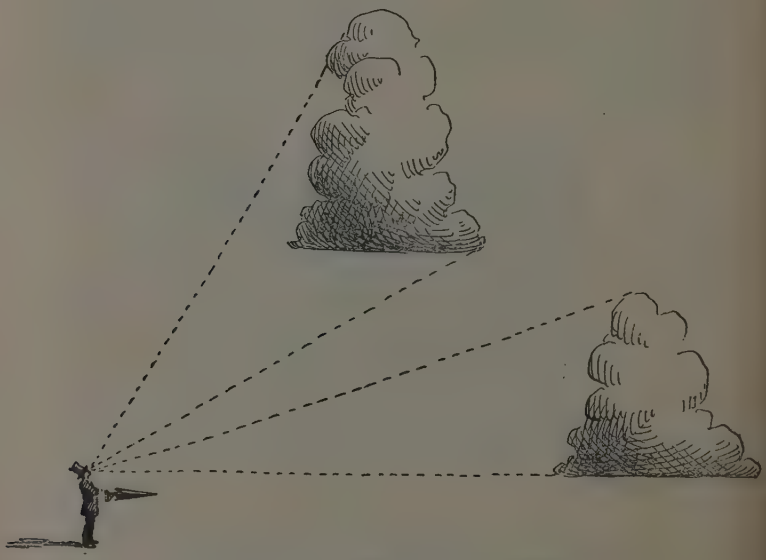
Globo-cumulus.

Telles sont les innovations que Poëy a introduites dans la nomenclature des nuages; il me reste à examiner pourquoi il n'adopte pas plus le *cumulo-stratus* et le *stratus* d'Howard qu'il n'admet son *nimbus.*

C'est comme faisant double emploi avec le cumulus proprement

1. *Bulletin mensuel de la Commission météorologique de Meurthe-et-Moselle.*

dit, que l'auteur français supprime le terme de *cumulo-stratus*. Howard désignait ainsi les cumulus qui reposent sur une base horizontale; or, c'est le cas de tous les cumulus proprement dits sans exception. Vous savez que cette base s'établit au niveau précis où l'air, qui monte sous l'influence du courant ascendant produit par l'échauffement du sol, atteint son point de rosée. C'est quand le nuage est à une grande distance horizontale de l'observateur que sa base, vue de profil, se montre rectiligne. Un nuage identique, situé à 45 degrés du zénith, se verra en partie par-dessous et sa base, quoique toujours formée par un plan horizontal, ne semblera plus rectiligne. Voilà, je crois, l'erreur qu'a commise Howard en distinguant des cumulus avec ou sans base horizontale.



Cumulus voisin du zénith et cumulus à l'horizon.

Les cumulus voisins du zénith et vus par-dessous affectent donc une forme quelconque. Quand l'un d'eux vient à masquer le soleil, il peut induire en erreur un observateur inexpérimenté par son aspect menaçant. Comme l'a fait spirituellement remarquer

M. Philippe Weilbach[1], ce sont les nuages de cette catégorie qui sont cause que tant de gens vous disent « qu'il ne pleut jamais quand ils prennent leur parapluie ».

Pour le *stratus*, je trouve que Poëy a eu raison de n'en pas faire un type fondamental, mais qu'il a eu tort de le supprimer entièrement.

Voici comment je crois avoir observé que ce nuage prend naissance.

On sait que les cumulus se forment sous l'influence de l'échauffement du sol; leur dimension verticale va en croissant avec la chaleur du jour, en même temps leur base horizontale s'élève. Vers le soir, quand le courant ascendant perd de sa force, les cumulus s'affaissent; les masses d'air redescendent, s'échauffent par le fait de leur contraction et par le voisinage du sol; la vapeur d'eau qui descend plus bas que le niveau où se trouve le point de rosée se dissout, mais la portion qui n'est pas dissoute s'étale en une nappe légère à ce niveau. Cette mince couche nuageuse produit l'illusion d'un ciel couvert si elle plane au-dessus de l'observateur, mais à l'horizon elle apparaît comme une bande rectiligne parce qu'elle est vue par la tranche : c'est là le *stratus* d'Howard, nuage du soir et d'horizon, comme le cumulus est un nuage d'été, de jour et d'horizon. Ce nuage dérive du cumulus, c'est vrai; c'est, si l'on veut, le résidu du cumulus de la journée et l'embryon du cumulus du lendemain, mais voici quelle est son importance.

Quand l'atmosphère n'est pas humide et, par suite, lorsque le beau temps doit durer, les cumulus disparaissent entièrement le soir, sans laisser après eux le moindre stratus. Mais quand, après une série de beaux jours, les stratus deviennent plus nombreux ou plus étendus chaque soir, on doit en conclure que l'air devient plus humide et que le changement de temps est proche.

Le nom de *stratus* s'applique aussi aux barres horizontales qui coupent, comme d'un trait de plume, la tête des cumulus dans les temps orageux. Si l'on admet que ces barres se forment dans les mêmes conditions que les stratus de l'horizon et du coucher du soleil, on en conclura que le niveau où se trouve le point de satu-

1. *Formes des nuages dans l'Europe septentrionale. Annuaire de l'Institut météorologique du Danemark.*

ration est à des hauteurs différentes dans les deux colonnes d'air contiguës, c'est-à-dire celle qui contient le cumulus et celle où s'est formé le stratus, et que l'air monte dans la première tandis qu'il descend dans la seconde. C'est là une situation anormale et instable, qui explique suffisamment pourquoi l'on est menacé d'un orage quand le sommet des cumulus est ainsi barré de stratus. Vous voyez que cette forme de nuages a bien son importance.

Mais il y a d'autres lacunes dans la nomenclature de Poëy. Tous les nuages des couches inférieures ne sont pas produits par un courant ascendant, sous l'influence du calorique terrestre, comme le cumulus, ou ne sont pas sous la dépendance des cirrus des hautes régions comme le pallio-cumulus et ses compagnons. La vapeur passe également à l'état visible au contact de deux courants aériens horizontaux, mais de température différente. Les nuées ainsi engendrées, n'ayant pas la forme « en agrégation ascendante » et ne reposant pas sur une base horizontale, ne peuvent s'appeler des cumulus; or, Poëy ne les mentionne pas. Peut-être est-ce à eux que songeait Howard quand il distinguait les *cumulus* et les *cumulo-stratus*.

Parmi les nuages produits au contact de deux courants de température et d'humidité différentes, il est une forme assez fréquente et qui, vu son importance, mériterait certainement un nom spécial; je veux parler d'une nappe de nuées qui se forme à la limite commune de deux courants aériens de sens contraire et immédiatement superposés.

Dans cette couche nuageuse, différente des palliums de Poëy, se remarquent des sillons ondulés, mais parallèles, se détachant en une teinte plus claire et alternant avec des bandes plus foncées, également ondulées et parallèles; le tout ayant l'apparence de vagues aériennes vraisemblablement produites par le frottement des deux masses d'air en mouvement. C'est à cette forme que conviendrait mieux le nom de *mackerel-cloud*[1] par lequel les marins anglais désignent le ciel pommelé, mais peut-être confondent-ils ces deux sortes de nuages qui ont cependant une origine bien différente. Les expressions de vagues aériennes, ou vagues nua-

1. Par analogie avec les dessins ondulés qui se remarquent sur le dos des maquereaux.

geuses, ou encore nuages en vagues conviendraient bien à ce voile ondulé; je laisse aux personnes amies du latin le plaisir de lui trouver un nom en *us*.

Il y a encore condensation de la vapeur quand un courant d'air humide traverse un espace circonscrit où existe une cause locale de refroidissement. Les aéronautes, M. Tissandier en particulier, ont signalé à diverses reprises l'existence de nuées immobiles, paraissant comme ancrées dans le lit d'un courant atmosphérique d'une vitesse de 8 à 10 mètres par seconde. Ce phénomène se produit au-dessus des étangs, des marécages, des prés humides, des forêts, etc. Voilà encore une sorte de nuage omise par Poëy.

Enfin le météorologiste français, comme tous ses collègues non marins du reste, ne fait pas mention de la forme en arc que prennent certaines nuées orageuses, autrement dit des *grains arqués*. Je reproduis ici la description que j'en ai donnée en 1883 dans une *Étude sur les orages dans le département de Meurthe-et-Moselle*[1].

Grain arqué.

Ces grains, comme leur nom l'indique, ont la forme d'un grand arc noir, généralement assez surbaissé, dont les deux pieds semblent toucher le sol, et qui marche avec rapidité suivant une trajectoire perpendiculaire à la ligne qui joindrait les deux pieds de l'arc. Le plan de cet arc n'est pas vertical, il est toujours incliné en avant; le bord inférieur du nuage est nettement tracé et le segment qu'il embrasse est d'un blanc brillant quand le soleil est derrière lui par rapport à l'observateur; le bord supérieur, au

1. Voir *Bulletin de la Société des sciences de Nancy*, année 1883, page 31.

contraire, est assez diffus, surtout au sommet de l'arc, qui est toujours moins sombre que les pieds. Ceux-ci sont au contraire très noirs et lancent la foudre et la grêle à torrents, tandis que, sous la voûte, on ne reçoit qu'une pluie souvent diluvienne il est vrai. Combien de temps ce nuage conserve-t-il sa forme? Sans doute les inégalités du sol le déforment ou le divisent, ce qui expliquerait sa rareté relative sur les continents. Dans ce cas l'arc se rompt à la partie supérieure, les deux portions se résolvent en pluie ou sont attirées par leurs pieds respectifs; on a alors deux orages séparés. Même quand les grains arqués sont le mieux formés, la partie supérieure est toujours plus claire que les pieds, ce qui dénote une tendance à la rupture de l'arc.

Ces grains, fréquents dans les mers où règnent les moussons, aux époques où la circulation atmosphérique se renverse, se montrent quelquefois sur nos côtes; ils amènent alors la saute au N.-O. par laquelle se terminent fréquemment les mauvais temps de S.-O. Ils sont bien connus des marins, mais ne sont cependant pas particuliers à l'Océan, puisque j'en ai observé quelques-uns en Lorraine depuis 1878[1].

Peut-être la plus grande rareté des grains arqués sur terre vient-elle de la position spéciale dans laquelle il faut se trouver pour bien constater leur forme. Il est nécessaire, en effet, de se trouver en un point d'où l'on puisse embrasser un horizon étendu, soit en plaine, soit sur une hauteur, car la distance des deux pieds de l'arc est de plus de 10 kilomètres (12 dans celui du 19 juillet 1879, un pied est passé sur Nancy, l'autre entre Saint-Nicolas et Dombasle). Il faut en outre que le grain marche vers l'observateur, car une personne en dehors du grain, mais en prolongement du plan de l'arc, ne pourrait constater la forme du météore.

J'attribuerais volontiers à des grains arqués les deux zones de grêle étroites, parallèles, mais s'étendant sur une grande longueur, que l'on est souvent conduit à tracer sur les cartes d'orages[2].

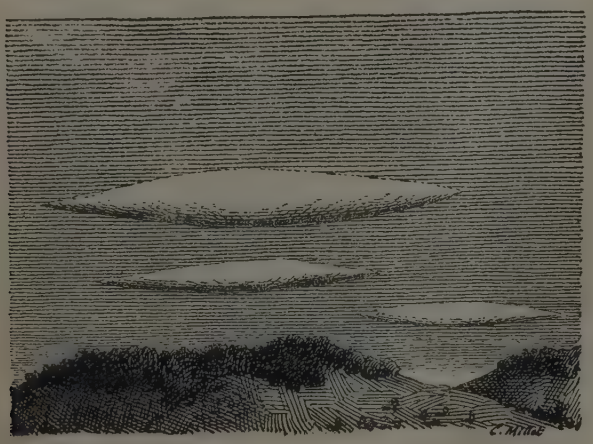
1. Voir *Bulletin de la Commission météorologique de Meurthe-et-Moselle*, année 1879, page 25.

2. Le seul ouvrage où il soit fait mention de quelque chose d'analogue au grain arqué est : *Leçons sur l'électricité professées en* 1875-1876, par J. Tyndall,

Quoi qu'il en soit, et pour conclure, la classification proposée par le météorologiste français André Poëy constitue, malgré les lacunes que nous avons signalées, un grand progrès sur celle que l'on suivait jusqu'alors. Le *pallium,* en particulier, est une innovation des plus heureuses; qu'attendent donc les auteurs français pour l'adopter? Faudra-t-il qu'il nous revienne d'outre-Rhin, car nos voisins ont reconnu l'utilité de ce terme et s'en servent.

Note complémentaire. — A la liste des formes de nuages encore innommées, quoique bien définies, il convient d'ajouter aussi celle que mentionne M. Plumandon, météorologiste adjoint à l'observatoire du Puy-de-Dôme, et dont l'apparition indique la présence d'une dépression secondaire dans le voisinage immédiat de l'observateur.

D'une blancheur opaline, à contours très nets et d'une apparence très dense, ces nuages affectent généralement la forme de fuseaux, c'est-à-dire d'un ovale très allongé, terminé par deux pointes effilées.



Nuages de mistral.

traduites de l'anglais par Francisque Michel (Gauthier-Villars, 1878). A propos du choc en retour, l'auteur reproduit, page 143, une figure empruntée à lord Mahon et qui représente un nuage en forme d'arc dont les deux extrémités sont assez voisines du sol : tandis que l'une lance la foudre, l'autre produit le choc en retour.

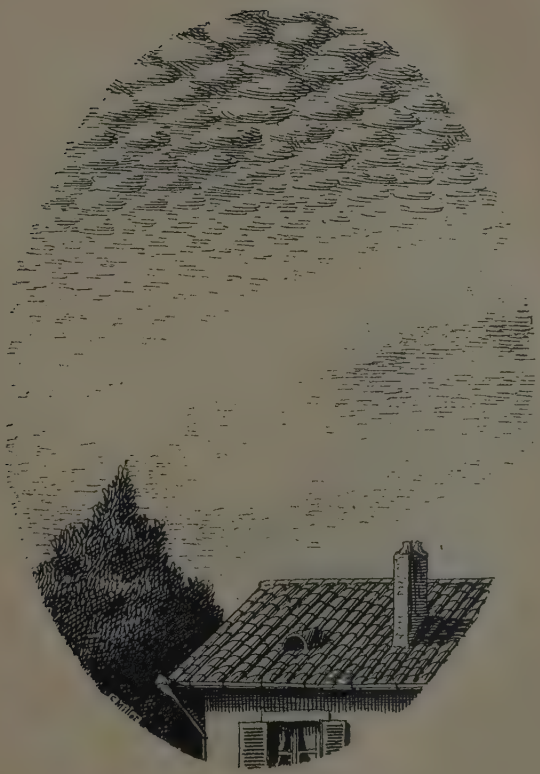
Souvent trois ou quatre de ces nuages sont superposés ou placés les uns à côté des autres. Ils apparaissent ordinairement au milieu d'une éclaircie et dans un ciel d'un bleu très franc.

Ce sont essentiellement des nuages de vent; ils indiquent d'où celui-ci soufflera avec force. M. Plumandon ne dit pas dans quel secteur de la dépression secondaire on observe ces nuées; je les crois spéciales au côté maniable, car, en Lorraine du moins, elles n'apparaissent presque jamais que dans l'Est ou le Nord-Est, avant ou pendant que souffle un vent fort de cette direction. De Nancy, c'est au-dessus du plateau de Malzéville qu'on les aperçoit.

En Provence, où ces nuages sont beaucoup plus fréquents, ils semblent appartenir à la partie postérieure des dépressions du golfe de Gênes, car ils accompagnent les vents violents de Nord au Nord-Ouest, si bien qu'à Toulon, mes collègues de la marine et moi, nous les avions baptisés « nuages de mistral ».

C. M.

Cirrus (queue de chat).



Cirro-cumulus (ciel pommelé).

Cumulus coupé par un stratus.

Stratus au crépuscule.

LE

CYCLONE DU 3 JUIN 1885

A ADEN

ET LA PERTE DU *RENARD*

Par M. C. MILLOT

ANCIEN OFFICIER DE MARINE, CHARGÉ D'UN COURS COMPLÉMENTAIRE DE MÉTÉOROLOGIE A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

Communication faite à la Société, dans sa séance générale annuelle du 16 décembre 1885

Dans le courant du mois de juin 1885, les journaux ont annoncé la perte du navire de guerre français *le Renard*[1], englouti dans un cyclone le 3 du même mois, pendant la courte traversée d'Obock à Aden. La presse tout entière a partagé l'émotion publique, puis le silence s'est fait sur cette catastrophe, comme les flots se sont refermés sur le malheureux navire et son vaillant équipage.

En abordant ce triste sujet, j'ai eu autant pour but d'adresser un souvenir à mes infortunés collègues, que de faire connaître le résultat de mes recherches sur les circonstances dans lesquelles ce naufrage a eu lieu; car, je dois le dire de suite, ces résultats se bornent à très peu de chose, à cause du petit nombre des renseignements que j'ai pu me procurer.

1. Aviso de 1re classe, 92 hommes d'équipage, commandé par M. le capitaine de frégate Peyrouton-Laffon de Ladébat.

Le cyclone du 3 juin, à Aden, a surpris toutes les personnes qui connaissent la circulation atmosphérique au-dessus de la mer des Indes, et en particulier les météorologistes et les marins. Pour vous faire bien saisir ce qu'une pareille tempête, à cette époque et dans ces parages, avait d'inattendu, permettez-moi de vous rappeler en quelques mots le régime des moussons de la mer des Indes.

Vous savez que, dans l'Atlantique et l'Océan Pacifique, qui s'étendent d'un pôle à l'autre, il règne, de chaque côté de la bande de calmes inséparables du maximum thermal, des vents alizés de Nord-Est, au nord de l'équateur, et de Sud-Est, au sud de la ligne équinoxiale. Il n'en est plus de même pour l'Océan Indien. Cette mer n'est, en fait, qu'un golfe bordé de trois côtés par d'énormes masses continentales : la vaste Asie au Nord avec ses péninsules de l'Inde, l'Afrique à l'Ouest et l'Australie à l'Est. Au sud de l'équateur, la mer des Indes s'étend librement jusqu'au pôle, aussi l'alizé de Sud-Est y souffle-t-il toute l'année comme dans les autres océans.

Mais la situation est bien différente au nord de l'équateur. L'Asie empêche l'alizé du Nord de souffler sur cette mer; le mouvement de l'atmosphère dépend alors de l'échauffement inégal des continents voisins durant l'été et l'hiver.

Pendant notre hiver, de novembre à avril, tandis que le maximum thermal et de basses pressions s'établissent sur l'Afrique australe, la zone des calmes descend sur la mer des Indes jusqu'à 10° sud et ne dépasse guère cette limite. L'alizé de Sud-Est s'arrête donc à 10° sud. Mais au nord de l'équateur règne la mousson de Nord-Est qui souffle de l'intérieur du continent asiatique, où existent à ce moment un froid relatif et des hautes pressions, vers le maximum thermal africain. Le vent de Nord-Est, en approchant de l'équateur et en le franchissant, s'incline peu à peu au Nord, puis au Nord-Ouest.

L'inverse a lieu pendant notre été, de mai à octobre. Le foyer d'aspiration s'est transporté sur le continent asiatique et il n'y a plus de calmes sur la mer. L'alizé de Sud-Est se prolonge au delà du dixième parallèle sud, il se rapproche graduellement de la direction du méridien en s'avançant vers l'équateur; puis lorsqu'il

a franchi la ligne, il se transforme en vent de Sud-Sud-Ouest, puis enfin en vent de Sud-Ouest, sous l'action puissante du tirage asiatique. C'est la mousson de Sud-Ouest.

Pendant la mousson de Nord-Est, le ciel est clair, le vent faible ; au contraire, la mousson de Sud-Ouest souffle très fort, avec ciel couvert et averses diluviennes sur les côtes de l'Inde. Elle est particulièrement bien établie le long de la côte d'Afrique, vers Gardafui, où elle possède une grande violence, mais aussi une grande régularité.

L'époque où la circulation atmosphérique se renverse est une saison critique. Les vents contraires ne se succèdent pas brusquement. La transition est marquée, ici par des calmes, là par des vents variables, et c'est à peu près uniquement à la fin de la mousson de Sud-Ouest, c'est-à-dire en octobre, que soufflent les tempêtes au nord de l'équateur. Leur violence dépasse tout ce qu'on connaît dans les climats d'Europe ; elles rendent la navigation extrêmement dangereuse à ce moment de l'année.

Or le tourbillon dans lequel a sombré le *Renard* a eu lieu le 3 juin, à l'époque où la mousson de Sud-Ouest, bien établie, souffle avec le plus de régularité ; première circonstance qui demeure inexpliquée.

De plus, bien que la trajectoire des cyclones de la mer des Indes au nord de l'équateur ne présente pas la régularité qu'elle a dans les autres océans, il y a cependant un certain nombre de pistes connues, toujours les mêmes, entre lesquelles la tempête fait un choix, pour ainsi dire.

La seule trajectoire connue pour les cyclones de la mer d'Oman, les seuls que nous ayons à considérer ici, est celle qui les fait rouler le long de la chaîne des Ghâtes occidentales, du Sud au Nord. Avant le 3 juin dernier, jamais, de mémoire de navigateur, le golfe d'Aden, ni le Sud de la mer Rouge n'avaient été sillonnés par un tourbillon ; deuxième phénomène également inexpliqué.

Analysons maintenant les récits émanant de plusieurs navires qui, n'ayant fait que coudoyer le monstre, ont pu échapper à son étreinte et voyons si nous pouvons en tirer quelque déduction au sujet de ses dimensions, de sa violence et de la route qu'il a suivie.

Les renseignements qui suivent sont empruntés à la presse et particulièrement à celle des ports.

Le *Renard* est parti d'Obock à destination d'Aden, le 3 juin, avec des vents variables du Sud-Ouest à l'Ouest, permettant d'établir toute la voilure, c'est-à-dire avec une brise modérée.

Cependant le centre du météore devait être bien rapproché, puisque l'infortuné navire a dû le rencontrer après avoir parcouru seulement une distance de moins de vingt lieues marines.

Il y a lieu de s'étonner qu'un cyclone aussi violent ait eu un rayon d'action aussi limité ; qu'il ne se soit pas annoncé par certains indices perturbateurs, tels que raz-de-marée ou des mouvements insolites du baromètre.

Dans le golfe d'Aden, la marée du baromètre existe ; il est surprenant qu'elle n'ait pas cessé depuis un temps appréciable avant le départ d'Obock.

Avec des vents variables entre le Sud-Ouest et l'Ouest, comme nous l'avons dit plus haut, la route d'Obock à Aden était près du vent arrière. Ajoutons qu'elle concorde avec celle que prescrivent les instructions nautiques pour s'écarter du centre du cyclone.

Que faut-il donc penser ? Quelle est la présomption la plus vraisemblable ?

L'idée de la proximité d'une tempête tournante n'a dû entrer qu'en dernier lieu dans l'esprit du capitaine du *Renard*, pour deux raisons : d'abord l'absence de tout indice de perturbation avant son départ d'Obock, ensuite la conviction qu'il n'y a pas de cyclones dans ces parages, puisque, de mémoire d'Arabe, on n'avait jamais vu semblable phénomène.

Voici dès lors ce qui probablement a dû arriver : le commandant, voyant le vent d'Ouest-Sud-Ouest fraîchir rapidement, ne pouvant pas admettre la possibilité d'un cyclone, aura voulu, en venant sur bâbord (sur la gauche), gagner immédiatement la côte d'Arabie pour se mettre à l'abri des terres, sauf, dans cette position, à laisser porter ensuite sur Aden. De cette façon, le *Renard* aura donné trop de Nord à sa route et il sera venu se jeter lui-même au centre du météore qui, en appliquant les règles à ce cas particulier, devait être dans le nord d'Obock, et il aura été englouti.

Je vous ai décrit, dans une communication précédente [1], les dangers que court un navire au centre d'un cyclone. Le cas du *Renard* était particulièrement délicat : c'était un grand rouleur. Ce bâtiment, que j'ai connu, avait la réputation de faire admirablement tête au mauvais temps, à la condition de rester toujours debout à la lame ; il supportait très mal la mer du travers.

Dans ces conditions, le *Renard*, qui aurait probablement triomphé d'un cyclone à grand rayon, dans lequel le vent et les vagues ont des directions peu différentes, devait périr dans un tourbillon de faible diamètre où le vent, changeant plus rapidement que les vagues, tourmente davantage la surface de la mer. Je vois encore là une preuve que le tourbillon d'Aden avait un petit rayon, mais une grande violence.

Celle-ci est bien prouvée, du reste, par les avaries qu'a subies la corvette anglaise *Bacchante*, à l'ancre devant Aden.

Depuis quelques jours, la chaleur était étouffante et le temps énervant ; mais le baromètre ne bougeant pas, personne ne prévoyait une tempête. Cependant le 3, à midi, elle éclate comme la foudre. A bord de la corvette anglaise, on est absolument surpris par l'ouragan. La machine est en réparation ; on la remonte en toute hâte afin d'être prêt à toute éventualité. Les embarcations à vapeur sont mises sous pression, mais avant qu'elles aient appareillé, elles sont roulées le long du bord, remplissent ou chavirent et finalement disparaissent.

Le vent est au Nord-Ouest et la *Bacchante* est évitée debout au vent, mais d'énormes vagues venant du Nord-Est la prennent en travers et la font rouler d'une façon désordonnée ; la mer balaie le pont dans toute sa longueur et enlève les embarcations hissées contre les flancs du navire ; les ancres chassent, on en mouille une troisième. Alors seulement on a conscience que c'est à un cyclone qu'on a affaire ; le baromètre a baissé tout à coup de 27 millimètres, le vent ne change pas, donc on est sur la route du centre.

A 2 heures, le navire a de la vapeur et tout est prêt pour résister à l'ouragan qui souffle avec rage. C'est à ce moment qu'on a dû

1. Voir *Bulletin de la Société des sciences*, page 38. 1884.

Nord
MER ROUGE
ARABIE
Moka
Détroit de Bab el Mandeb
Cheik-Said
ADEN
Assab
ABYSSINIE
Ile de Perim
Lieu présumé de la perte du Renard
GOLFE D'ADEN
OBOCK
Golfe de Tadjourah
Zeylah
CÔTE DE SOMALI

se trouver presque au centre, car le vent sauta tout à coup à l'Est-Sud-Est, pour souffler dans une direction diamétralement opposée. Sa vitesse a été évaluée à environ 150 kilomètres à l'heure, soit 41 à 42 mètres à la seconde. A 3 heures, le vent passe au Sud-Est et mollit graduellement. A 5 heures, tout est fini, il fait calme. La plage est couverte de débris, tous les canots et bâtiments de petit tonnage sont à la côte.

Le malheureux *Renard* n'est pas le seul navire qui ait péri dans l'ouragan du golfe d'Aden. La corvette allemande *Augusta* s'est trouvée dans les mêmes parages et on n'en a plus entendu parler. Plusieurs navires de commerce anglais ont été également perdus corps et biens.

De ce qui précède, nous pouvons conclure que le centre du tourbillon a passé sur Aden, ou excessivement près de cette ville, et comme le vent a soufflé d'abord du Nord-Ouest, puis du Sud-Est, il s'ensuit que le météore marchait du Nord-Est au Sud-Ouest, c'est-à-dire se rapprochait de l'équateur. C'est là un cas assez rare.

En général, les cyclones s'éloignent de la ligne, et ceux qui s'en rapprochent ne tardent pas à se dissiper. En tout cas, un ouragan ne peut jamais franchir l'équateur; car il lui faudrait changer le sens de sa rotation et, pour cela, commencer par cesser de tourner, ce qui le ferait évanouir.

On possède encore d'autres renseignements sur le cyclone d'Aden. Il a été rencontré dans la mer d'Oman par un paquebot anglais, qui se rendait d'Aden à Pointe-de-Galles, et par le paquebot français *Rouen,* frété par l'État, qui suivait la même route et portait des troupes au Tonkin.

C'est dans la nuit du 31 mai au 1er juin que le *Rouen* a fait cette mauvaise rencontre.

J'ignore malheureusement par quelle longitude, sans cela je pourrais conclure la vitesse de translation de la tempête. Quant à sa latitude, elle est indiquée par ce fait que les deux paquebots en question se sont trouvés du côté ~~maritime~~ dangereux. Le centre était donc à une latitude un peu plus méridionale que la route des navires qui vont de la mer Rouge à Ceylan, et il marchait de l'Est-Sud-Est à l'Ouest-Nord-Ouest à travers la mer d'Oman.

Comment se fait-il que nous le retrouvions, deux jours après,

TRAJECTOIRE PRÉSUMÉE DU CYCLONE D'ADEN.

à Aden, marchant du Nord-Est au Sud-Ouest ? Quelle est la cause qui a pu modifier ainsi sa trajectoire ? Ce sera toujours une énigme pour la science, parce que les contrées qui bordent le golfe d'Aden ne sont que des déserts, à peine parcourus par quelques tribus nomades ou farouches, et il s'écoulera probablement de longues années avant que ces rivages inhospitaliers soient couverts d'un réseau de stations météorologiques.

En résumé, j'ai pu reconstituer deux tronçons de la trajectoire du centre de ce terrible cyclone : l'un, au milieu de la mer d'Oman, dirigé de l'Est-Sud-Est à l'Ouest-Nord-Ouest, dans une position un peu plus méridionale que la route des navires d'Aden à Pointe-de-Galles; l'autre à Aden même, dirigé du Nord-Est au Sud-Ouest. En ce point, le tourbillon devait avoir un diamètre d'une dizaine de lieues marines environ, soit 55 kilomètres et demi, et il marchait avec une vitesse de 14 kilomètres à l'heure, puisque la tempête a duré 4 heures à Aden. Sa vitesse de rotation était au moins dix fois plus grande, puisqu'elle a été évaluée à 150 kilomètres; le sens du tourbillonnement des masses d'air est celui que l'on constate invariablement dans l'hémisphère nord.

RECHERCHES

SUR LES

VERS PARASITES DES POISSONS

Par A. PRENANT

AIDE D'HISTOIRE NATURELLE A LA FACULTÉ DE MÉDECINE

LICENCIÉ ÈS SCIENCES NATURELLES

Communiquées à la Société des Sciences le 1er juillet 1885.

Pendant l'hiver dernier, je me suis occupé de la recherche des parasites et tout particulièrement de ceux qui habitent les poissons d'eau douce et de mer. Ces parasites étant fort nombreux, j'ai dû me borner à l'étude de certains groupes (les vers plats surtout). Les Nématodes, par exemple, sont très bien représentés chez les poissons ; mais leur détermination présente de grandes difficultés, les types que l'on observe étant moins différents les uns des autres que ne le sont ceux des Cestodes et Trématodes. J'ai donc, sauf quelques cas particulièrement intéressants, négligé à peu près complètement ce vaste groupe des Nématodes.

Je recevais au laboratoire d'histoire naturelle de la Faculté de médecine de Nancy des débris de poissons (tête, intestins) qui provenaient de la halle à la criée et du marché couvert. Ces parasites se trouvaient presque toujours vivants et j'en prenais immédiatement un dessin, ou bien, je ne les dessinais qu'après les avoir tués à l'aide de l'acide formique à $^1/_{100}$ et montés en préparation persistante dans un liquide conservateur. Le moins mauvais

m'a paru être une liqueur glycérinée renfermant 5 à 6 p. 100 de glycérine additionnée de quelques gouttes d'acide acétique.

Je dois remercier M. Forgeot, qui me suppléait en qualité d'aide-préparateur à la Faculté, pour le concours empressé qu'il m'a prêté. C'est lui, en effet, qui s'est chargé de la recherche des parasites dans les intestins des poissons, tandis que je m'occupais de leur détermination.

Cent vingt-un poissons ont été ainsi examinés, répartis entre quinze espèces. Nous avons dressé une liste qui contient l'indication, poisson par poisson, des parasites que nous avons rencontrés dans chacun d'eux, du nombre de ces parasites et de leur siège. Beaucoup de ces vers ont été dessinés tant par M. Forgeot que par moi.

Je ne ferai connaître ici que les résultats statistiques principaux qui me paraissent découler de la liste que nous avons établie.

Un travail à la perfection duquel j'aurais voulu atteindre a été fait par M. Fritz Zschokke et publié dans les *Archives de biologie*[1]. C'est un peu la lecture de ce mémoire qui m'a décidé à utiliser les faits dont je disposais.

Une première partie, partie statistique de ces recherches, contient la distribution des parasites dans les différents poissons.

La deuxième partie renferme la description de quelques parasites intéressants peu étudiés ou même nouveaux, et l'exposition de quelques faits anatomiques.

I. — PARTIE STATISTIQUE.

Il serait long et fastidieux d'énumérer les parasites des poissons dans l'ordre que nous avons dû suivre dans l'établissement de notre liste où nous les avons consignés en regard de chaque poisson examiné. Je procéderai suivant la classification des vers eux-mêmes.

1. Fritz Zschokke, t. V, fasc. II.

CESTODES.

Adultes.

Tétrarhynques *et* Tétraphylles. — La raie (*Raja batis* et *Raja clavata*) est le seul poisson de mer qui m'ait présenté des individus adultes de ces familles. Elle est en effet le seul poisson cartilagineux que j'aie pu examiner. Et l'on sait que les Tétrarhynques et les Tétraphylles vivent à l'état adulte dans les Chondroptérygiens. Elle est très abondamment pourvue de vers de ces deux familles ; d'un autre côté, elle ne m'a offert aucun parasite appartenant à d'autres groupes. Vingt-six raies ont été examinées, huit hébergeaient des parasites. Je signalerai tout d'abord deux Anthocéphales qui se trouvaient l'un dans l'estomac, l'autre dans l'intestin de la raie.

Les Anthocéphales ont été décrits pendant longtemps comme appartenant à un genre distinct, le G. Anthocéphale dont on a fait un certain nombre d'espèces. Je dois dire que dans les divers poissons où j'ai rencontré des Anthocéphales, je ne crois jamais avoir eu sous les yeux qu'une seule espèce : *Anthocephalus elongatus*. Les Anthocéphales, regardés d'abord comme faisant partie d'un genre autonome, ont été ensuite considérés comme des larves de Tétrarhynques. Il faut avouer que cette larve est quelque chose de plus qu'une simple phase du développement de l'animal Tétrarhynque, et qu'on aurait tort de ne pas lui accorder une plus grande importance qu'aux états successifs par lesquels passe un jeune Cypris, par exemple, pour arriver à l'état adulte. Là, le passage d'une phase à une autre n'est marqué que par la perte de certains appendices et par le gain de quelques autres. Ici la transformation du premier scolex du Tétrarhynque en ce second scolex, l'Anthocéphale, est profonde. Et la larve Anthocéphale est une étape si importante dans le développement, que cette larve a pu faire croire pendant longtemps, tant par la durée de son existence que par la spécialisation de son organisation, qu'elle était un genre distinct. Le nombre s'accroît tous les jours d'espèces animales regardées longtemps comme autonomes qui ne sont cependant que des larves, mais des larves très spéciales.

Les Anthocéphales, tels que je les ai observés dans d'autres

poissons que la raie (chez trois cabillauds, — chez sept merlans, — dans la cavité branchiale de six rougets, et dans tous ces cas en grande abondance et d'une façon presque constante), se rapportent à la description que l'on en donne habituellement dans les ouvrages d'helminthologie, celui de Dujardin, par exemple. Le ver, avec son corps allongé et son extrémité antérieure élargie en forme de fer de lance en une tête où l'on distingue quatre trompes, est entouré d'une membrane épaisse qui lui forme un kyste propre. Ce kyste est à son tour enkysté, c'est-à-dire enfoui dans une gaîne adventice constituée par le tissu conjonctif de l'organe où l'animal vit. Les deux Anthocéphales que j'ai trouvés dans la raie étaient, au contraire, libres dans l'estomac et l'intestin de ce poisson. On peut supposer alors ou bien que ces Anthocéphales, libres dans le tube digestif de la raie sans doute par suite de la dissolution du poisson qui leur servait d'hôte, allaient s'enkyster sur le péritoine de la raie en gardant leur forme, ou bien qu'ils allaient se transformer dans l'intestin même de la raie en un Tétrarhynque adulte. Si le deuxième cas est celui qui doit se réaliser, la raie est bien le dernier hôte par lequel passe le Tétrarhynque dans le cours de son développement. Si le premier cas est au contraire celui qui se présente, on est en droit de penser que le passage de la pâture de la raie, dans le tube digestif de cette raie elle-même, n'a pas suffi pour déterminer le passage habituellement correspondant de l'helminthe asexué à la phase adulte ; en d'autres termes, la forme larvaire Anthocéphale peut avoir deux hôtes successifs. C'est uniquement à cause de l'état libre sous lequel j'ai trouvé les Anthocéphales de la raie que je me suis étendu aussi longuement sur ces parasites d'ailleurs depuis longtemps connus.

Dans l'intestin de la raie j'ai rencontré neuf fois et en grande abondance chaque fois : *Tetrarhynchus crinaceus*.

Tous les autres Cestodes de la raie appartiennent à la famille des Tétraphyllides. Les espèces de cette famille que j'ai trouvées étaient assez nombreuses, mais chacune n'était représentée que par un petit nombre d'individus. Toutes ont été décrites et figurées par P. Van Beneden dans ses *Recherches sur la faune littorale de Belgique*.

J'ai rencontré :

Onchobothrium uncinatum	2 fois.
Echeneibothrium variabile	2 fois.
Echeneibothrium minimum	2 fois.
Phyllobothrium thridax	1 fois.
Phyllobothrium lactuca	2 fois.
Acanthobothrium Dujardinii	2 fois.

Je n'ai pas trouvé *Echinobothrium typus,* parasite cependant fréquent, d'après Van Beneden, dans la raie.

Je ne quitterai pas la raie et ses parasites sans faire une remarque qui, si peu neuve qu'elle soit, mérite cependant par son importance d'être faite. Elle m'a été suggérée par l'observation du fait suivant : certaines séries de quatre ou cinq raies se sont montrées absolument pauvres en parasites, tandis que d'autres nous en offraient un très grand nombre et de très divers. Je ne puis expliquer cette différence de richesse entre des lots de raies que par leur provenance de régions différentes. Dans certaines de ces régions, les raies avaient une pâture très variée, et des parasites très divers par conséquent. D'autres raies, qui formaient un autre lot, vivaient dans d'autres eaux et avec des conditions inverses. En résumé, de ces faits, trop peu nombreux malheureusement, résulte que la distribution géographique d'un parasite adulte a pour facteurs, outre évidemment la présence de l'animal qui lui sert d'hôte, celle de la pâture de cet hôte.

C'est pour établir cette loi de la répartition géographique des parasites que Van Beneden a publié son important travail : *Les Poissons des côtes de Belgique.*

Caryophyllides. — Aucune des dix-neuf carpes que j'ai examinées ne m'a offert le *Caryophyllæus mutabilis* que cependant l'on regarde comme fréquent chez les Cyprinoïdes en général et la carpe en particulier.

Bothriocéphalides. — *Bothriocephalus claviceps* a été rencontré une fois dans l'intestin de l'anguille. *Bothriocephalus punctatus,* regardé comme constant chez le turbot, n'a été trouvé que dans l'un des trois turbots que j'ai eus à ma disposition, mais il y était très abondant.

Quant aux Bothriocéphales du saumon qui vivent dans les

cœcums pyloriques de ce poisson et y sont considérés comme habituels, je ne les ai pas trouvés dans les appendices pyloriques de trois saumons.

Les *Triænophorus* ont été représentés par quelques larves enkystées dans le foie de la perche et surtout par un grand nombre d'adultes trouvés chez le brochet. On sait, en effet, que chez ce poisson ce parasite est extrêmement commun. Sur cinquante-un brochets dont le tube digestif a été examiné, trois ne contenaient aucun parasite, quarante-quatre hébergeaient des *Triænophorus,* quatre renfermaient, au lieu de *Triænophorus,* des Échinorhynques. A cette époque, je recherchais avec un soin particulier les Échinorhynques, que je tenais à me procurer. Toutes les fois que dans le tube digestif du brochet nous observions, M.. Forgeot et moi, des *Triænophorus,* nous désespérions d'y trouver des Échinorhynques, et en continuant l'examen des tubes digestifs de brochets bourrés de *Triænophorus,* nous n'avions d'autre but que d'assurer l'exactitude de notre liste. Je fus ainsi amené tout naturellement à penser qu'il y avait entre ces espèces animales : *Echinorhynchus proteus* ou *angustatus* d'une part et *Triænophorus nodulosus* de l'autre une sorte d'antagonisme. La nature de cet antagonisme ne doit pas être cherchée dans une lutte pour la vie de deux espèces animales se rencontrant sur le même terrain. Vu l'éloignement de ces deux espèces, leurs conditions d'existence sont probablement très différentes et permettent parfaitement aux *Triænophorus* et aux Échinorhynques de vivre côte à côte. Cet antagonisme est tout mécanique. Les *Triænophorus,* par leurs puissants mouvements de reptation, s'enroulant autour des Échinorhynques fixés qui leur servent de point d'appui, empêchent ou détruisent la fixation des Échinorhynques nécessaire à leur vie. Ils ne gênent en rien les espèces qui vivent libres (*Ascaris adiposa* et *acus, Cucullanus elegans*) que l'on rencontre en même temps qu'eux en abondance. Un jour cependant je trouvai chez un brochet simultanément des *Triænophorus* et des Échinorhynques et depuis j'ai eu l'occasion d'observer deux fois ce même fait. Seulement ces Échinorhynques n'étaient pas fixés ; c'est dire qu'ils étaient morts ; c'était la confirmation de l'hypothèse émise plus haut sur l'influence néfaste des *Triæ-*

nophorus sur les Échinorhynques. Quant à l'origine de ces Échinorhynques, je pense qu'ils provenaient d'Échinorhynques déjà adultes vivant chez des poissons blancs de nos rivières avalés par le brochet et qui, par le fait de la digestion, avaient été mis en liberté. Je ne crois en effet pas possibles, en présence de *Triænophorus* préexistants, le développement et la fixation d'Échinorhynques avalés à l'état embryonnaire par le brochet, qui se serait nourri de *Gammarus* et d'*Asellus* hébergeant des larves d'Échinorhynques. Toutefois, les faits peuvent s'être passés autrement. Il se peut que les *Triænophorus* aient envahi le tube digestif du brochet déjà occupé par les Échinorhynques et détruit alors la fixation de ces parasites. C'est là une question que l'expérimentation seule peut cependant trancher.

Ligulides. — Une Ligule a été trouvée enkystée sur l'estomac, une autre sur le foie du brochet.

Tæniadés. — Les Tænias sont rares chez les poissons. Je n'en ai trouvé qu'un : le *Tænia ocellata,* que je n'ai d'ailleurs rencontré qu'une fois sur vingt perches examinées.

CESTODES LARVAIRES.

Outre les Anthocéphales dont j'ai parlé plus haut en les rattachant aux Cestodes adultes, les principaux Scolex que j'ai vus sur les poissons ont été :

La larve d'*Acanthobothrium Dujardinii* (deux fois chez la raie) ;

Scolex polymorphus, constant chez les quatre soles que nous avons examinées ;

Des Scolex de Tétrarhynques (du maquereau, du merlan) ;

Un Scolex trouvé chez dix-neuf congres, que j'ai considéré comme le *Scolex soleatus* (de Molin) ;

Le Scolex qui habite la cavité branchiale du rouget d'une façon qui paraît constante et qui s'y rencontre en grande abondance. Sur un seul individu j'ai observé jusqu'à quarante Scolex.

TRÉMATODES.

Le *Distomum rufoviride* est très fréquent chez le congre : dix-neuf de ces poissons ont présenté onze fois ce parasite. Le

Distome habite l'intestin et surtout l'estomac du congre ; le plus souvent l'extrémité cœcale de l'estomac est absolument bourrée de ces Trématodes. Le *Distomum rufoviride* ne vit pas exclusivement chez le congre et ne saurait donc être regardé comme parasite caractéristique de ce poisson, car l'on en trouve chez le turbot où je l'ai observé une fois sur trois.

Le *Distomum tereticolle* se rencontre chez le brochet dans des circonstances assez spéciales. Malgré le grand nombre de brochets examinés, chez deux ou trois seulement ce Distome s'est présenté. Dans chaque poisson, il y avait cinq ou six individus. C'est un fait déjà connu d'anciens helminthologistes que le *Distomum tereticolle* vit en groupes de quatre ou cinq au moins, de dix au plus, dans l'intestin d'un même brochet. Je signale une fois de plus ce fait sans chercher à en donner une explication. C'est sur des brochets des lacs de Suisse que le Distome a été découvert, et il vient d'y être signalé en grande abondance par M. Zschokke. Il ne paraît pas exister dans les brochets de nos rivières et de nos étangs qu'il m'a surtout été donné d'examiner. Je pense que si le *Distomum tereticolle* n'est pas constant dans les brochets qui vivent dans les grands lacs, il est du moins caractéristique des brochets qui ont cet habitat ; on peut donc, toutes les fois qu'on rencontre ce Distome dans l'intestin d'un brochet, sinon affirmer sa provenance lacustre, du moins avoir grande chance de le faire avec raison. En tout cas, ce serait une recherche intéressante que de comparer à ce point de vue les brochets de notre pays et ceux des lacs de la Suisse ; et si l'on arrivait à pouvoir, par la constatation du parasite, certifier l'origine de l'hôte, ce serait là certainement une donnée de quelque valeur dans le domaine de la géographie zoologique.

Le *Distomum nodulosum* vit chez la perche, dans l'intestin de laquelle il est commun.

Les cyprins renferment constamment, d'après ce que j'ai observé, le *Distomum globiporum*. Parmi dix-neuf carpes examinées, trois seulement renfermaient des parasites, parmi lesquels, chez toutes les trois, le Distome en question. J'ai observé l'intestin de deux barbeaux, de deux brêmes, d'un gardon ; tous ces poissons hébergeaient le *Distomum globiporum*. Une fois ce Dis-

tome a été vu dans l'intestin d'un brochet, provenant sans doute d'un cyprin récemment avalé.

Parmi les autres Trématodes que j'ai pu observer, je citerai :

Gasterostomum crucibulum, rencontré deux fois dans l'intestin du congre, dix-neuf congres ayant été ouverts ;

Un petit monostome qui vit chez le congre et qui est resté indéterminé ;

Octobothrium scombri, rencontré constamment chez treize maquereaux, et en grande abondance (10-15) chaque fois.

NÉMATODES.

On ne peut ouvrir un congre ou un cabillaud ou encore un saumon sans trouver une multitude de vers enroulés et enkystés sur le péritoine et dans l'épaisseur des parois digestives de ces poissons. C'est le *Filaria piscium* ou *Ichthyonema Congeri vulgaris,* forme larvaire de Nématode.

Le *Cucullanus elegans* est trop connu pour que j'insiste sur sa répartition. On le rencontre en grande quantité chez le brochet, la perche et l'anguille.

Examinant un jour, M. Forgeot et moi, une tête de brochet, nous vîmes sortir d'une des artères branchiales qui avait été rompue une sorte de filament qui s'agitait, que nous pûmes extraire avec une pince de l'artère où il était logé, et qui n'était autre qu'un Nématode. Ouvrant les autres artères branchiales, nous avons recueilli en tout cinq vers dont chacun occupait une artère branchiale. Quelque temps auparavant, M. le professeur agrégé Macé avait vu dans la cavité branchiale d'un brochet un Nématode semblable à celui que nous avons observé. Bien que ce Nématode ne fût pas en état très bon de conservation, la préparation que M. Macé en avait faite était grandement suffisante pour lui permettre de dire que c'était une filaire. Les exemplaires que j'observai moi-même corroborèrent cette détermination. Il s'agit donc d'une filaire qui peut occuper les artères branchiales du brochet, et qui, véritable embolie vermineuse, devait, dans le cas de notre poisson, être un obstacle à l'hématose. Si donc, comme nous le pensons M. Macé et moi, après les quelque

recherches bibliographiques que nous avons faites, cette filaire est une espèce nouvelle, le nom de *Filaria obturans* serait peut-être celui qui rappellerait la plus intéressante particularité de son histoire.

ÉCHINORHYNQUES.

L'*Echinorhynchus gibbosus* se trouve chez la vive.

Chez la perche, on a trouvé une fois sur vingt perches examinées, et au nombre de quinze exemplaires cette fois, l'*Echinorhynchus tuberosus*.

Je ne dirai rien des *E. angustatus, proteus, claviceps,* communs chez le brochet, la perche et les Cyprinoïdes.

HIRUDINÉES.

Sur cinquante-un brochets examinés, la Piscicole a été trouvée deux fois.

II. — PARTIE ANATOMIQUE.

NÉMATODES.

Filaria obturans.

Cette filaire est longue de 15 à 20 centimètres. Tous les individus que j'ai trouvés étaient des femelles remplies d'embryons. Celui que M. Macé a observé était une femelle également, mais dépourvue d'embryons. Les papilles buccales manquent. L'œsophage est long, plus large en arrière qu'en avant ; il a une forte musculature annulaire ; le canal qu'il forme est tortueux, sans doute parce que l'animal n'a pas été observé en état d'extension complète. L'intestin commence par une partie renflée et se termine par un rectum étroit et effilé auquel se trouve annexée une petite masse granuleuse. Celle-ci est évidemment le représentant du ganglion anal que l'on connaît chez d'autres Nématodes. Les

organes génitaux consistent en un ovaire étroit que l'on peut surtout voir à l'extrémité postérieure de l'animal, tout le reste du corps étant occupé par le volumineux utérus. Celui-ci était rempli d'embryons. Les parois de l'utérus ont un aspect très remarquable ; les crêtes papillaires, si bien décrites par M. E. Van Beneden chez l'*Ascaris megalocephala*, affectent ici une disposition circinée qui est peut-être caractéristique. A la suite de l'utérus vient le vagin qui se dirige jusque près de l'extrémité antérieure du corps et s'incurve ensuite en arrière pour se terminer environ au niveau de l'union du dixième antérieur avec les $^{9}/_{10}$ postérieurs de l'animal, après avoir présenté un renflement diverticulaire sur la nature duquel je n'ai pas pu me fixer. (Pl. I, fig. 1 A et fig. 1 B.)

CESTODES.

Un certain nombre de Scolex m'ont offert quelques particularités que je crois dignes d'être notées.

Scolex soleatus (Molin) [habite le congre].

Ce Scolex, examiné dans le chyle intestinal, se meut lentement, rampant à la façon des Planaires. Il perd rapidement à l'air ou même dans l'eau son mouvement et se contracte alors de façon qu'il devient méconnaissable.

Scolex Mulli (du rouget).

Il est remarquable par l'existence d'un anneau très court, bifide. C'est celui qui est signalé par Diesing sous le nom de *Tetrabothryorhynchus migratorius* (*larva*).

Scolex polymorphus (de la sole).

Ce Scolex, comme son nom l'indique, est très variable. Dans l'une des soles que j'ai ouvertes, il y avait de ces Scolex appartenant à deux types assez différents par leur taille. Les petits Scolex, nombreux (au nombre d'une quinzaine), possédaient autour du bulbe céphalique quatre bothridies allongées à cavité simple. Les grands (au nombre de trois seulement) avaient des bothridies dont la cavité était subdivisée par une cloison en deux comparti-

ments, en deux fossettes, dont l'antérieure plus petite. C'étaient évidemment là deux phases successives du développement.

Scolex de l'Acanthobothrium Dujardinii, et adulte.

Ce Scolex ainsi que l'adulte qui lui correspond ont été représentés par Van Beneden [1] et distingués de l'*Acanthobothrium coronatum*, espèce voisine. D'après Van Beneden, *A. coronatum* diffère d'*A. Dujardinii* : 1° parce qu'il est beaucoup plus long, offrant beaucoup plus de segments ; 2° et surtout parce qu'il a des crochets pairs sur chaque bothridie, au lieu que dans *A. Dujardinii* ils sont simples. Or nos *Acanthobothrium* que nous avons déterminés : *A. Dujardinii* d'après la faible longueur du corps et le petit nombre des segments, avaient les crochets doubles d'un *A. coronatum*. Le caractère distinctif entre les deux espèces, tiré de la forme des crochets et de leur disposition, ne semble donc pas valable. Ou bien, au contraire, c'est celui qui est fondé sur la forme et la longueur du corps qui est en défaut ici. Le caractère des crochets est plutôt, semble-t-il, celui qui est erroné ; car Van Beneden a pu prendre pour réunis à leur base d'implantation par une racine commune chez *A. Dujardinii*, les crochets bifurqués et pairs simplement très rapprochés l'un de l'autre à leur insertion. (Pl. I, fig. 2 et 3.)

Tetrarhynchus erinaceus.

Les crochets de ce Tétrarhynque n'ont pas été exactement figurés par Van Beneden. Cependant la forme et la disposition des crochets sont sans doute un caractère spécifique d'une certaine utilité. Ces crochets appartiennent à plusieurs types (en bec d'aigle, en clou, en bident) ; leur disposition est assez compliquée, un peu variable d'ailleurs suivant les points de la trompe qu'on examine. (Pl. I, fig. 5.)

TRÉMATODES.

Distomum tereticolle. (Pl. I, fig. 4.)

Je n'aurais rien à ajouter à la description que donne de ce remarquable Trématode M. Zschokke [2], si cet auteur n'avait com-

1. Van Beneden, *loc. cit.*
2. F. Zschokke, *loc. cit.*

plètement négligé de parler du système excréteur qu'il est cependant facile d'observer et qu'il est important de connaître, puisque l'appareil d'excrétion est un des plus caractéristiques des vers en général et des Trématodes en particulier.

Sur l'animal vivant on distingue aisément à l'extrémité postérieure du corps l'ampoule excrétrice petite et de forme allongée, claire et transparente. Elle débouche à l'extérieur non par un simple pore, mais par un petit conduit ; et, d'autre part, elle envoie en avant et dans l'axe du corps une longue branche impaire. Sur une préparation de l'animal entier monté dans le mélange de glycérine et d'acide acétique, on voit que de l'extrémité postérieure un peu bifide de l'animal part une ligne sombre qui se bifurque en arrière du testicule postérieur qu'elle embrasse, et dont chaque branche de bifurcation longe le bord ; en avant de ce testicule postérieur reparaissent très nets et parallèles les deux rameaux du conduit excréteur qui rencontrent bientôt le testicule antérieur, se comportent vis-à-vis de lui comme à l'égard du testicule postérieur ; marchant en avant de ce testicule entre lui et le germigène de nouveau côte à côte et parallèles, ils abordent le germigène au niveau duquel je les ai perdus de vue. Les coupes transversales sont aussi instructives et montrent ces dispositions du système excréteur.

Distomum rufoviride. (Pl. II, fig. 1.)

Outre sa couleur rougeâtre, ce Distome est caractérisé par l'existence d'un prolongement qui peut, dans l'extension complète de l'animal, atteindre la longueur du corps. Ce prolongement très musculeux contient l'appareil excréteur, ou plutôt il est cette partie de l'appareil excréteur dite ampoule excrétrice, dont l'existence est très générale chez les Trématodes. C'est donc là une véritable trompe excrétrice au même titre qu'il existe des parties de l'appareil digestif nommées trompes pharyngiennes. Les unes comme les autres sont d'ailleurs un prolongement du tégument dont elles dérivent, et offrent une structure qui est sensiblement celle de ces téguments.

Le tégument du *Distomum rufoviride* se compose, sur une coupe transversale et de dehors en dedans (Pl. II, fig. 2) :

1° D'une cuticule épaisse ;

2° D'une couche musculaire formée de muscles entre-croisés ;

3° D'une couche de substance granuleuse formant en certains points des saillies qui s'avancent vers l'intérieur du corps et qui contiennent, tantôt un gros noyau, tantôt un amas de noyaux plus petits. Cette couche s'insinue aussi entre les fibres musculaires qui y sont plongées.

Sur une préparation montrant les téguments de face (Pl. II, fig. 3) après traitement par le bichlorate de potasse à $^1/_{100}$ et coloration à l'hématoxyline ou au picrocarmin, on voit que la couche musculaire se compose de plusieurs plans de fibres : une assise de fibres pâles, aplaties, striées longitudinalement et se colorant peu par les réactifs (picrocarmin, hématoxyline), ce plan forme une couche presque ininterrompue[1] ; un plan de fibres musculaires longitudinales, transversales ou obliques ; ces fibres sont souvent disposées de manière à former un réseau à mailles très régulièrement rectangulaires croisées en diagonale par les fibres obliques. Ces fibres sont très différentes de celles qui constituent l'autre plan. Elles sont cylindriques, au lieu d'être aplaties. Elles sont réfringentes et non pâles comme les précédentes. Elles se colorent bien par les réactifs. Quelquefois elles sont ramifiées ou même se divisent en une foule de fibrilles très ténues. Cette description vaut surtout pour les fibres à direction transversale et longitudinale ; les fibres obliques leur sont souvent semblables, mais d'autres fois elles sont courtes, fusiformes au lieu d'être cylindriques, émettant parfois de nombreux filaments en pinceau, ou bien tri ou même multifurquées. Les longues fibres cylindriques dont il vient d'être question offrent une disposition intéressante : elles sont renflées de distance en distance à des intervalles assez réguliers, de façon à présenter un aspect moniliforme. Ce fait paraît dû à ce que ces fibres ont été tuées en état de contraction. Il s'est alors formé un certain nombre de nœuds ou ventres musculaires au niveau desquels la substance musculaire s'est accumulée et même tassée. Cela explique la co-

1. Elle est peu développée toutefois sur les téguments proprement dits ; elle l'est au contraire beaucoup sur des dépendances de ces téguments, comme l'ampoule excrétrice.

loration plus intense que la fibre présente dans ses parties renflées; il y a plus de coloration parce qu'il y a plus de matière à colorer. Cette exagération de coloration au niveau des renflements de la fibre ne peut pas être mise sur le compte d'un noyau; car il a été impossible d'en déceler un[1]. D'ailleurs ces renflements ou nœuds musculaires ont été plusieurs fois décrits et figurés. Par exemple, c'est à un phénomène analogue que M. Kœhler[2], dans ses recherches sur les Échinodermes, attribue l'aspect des fibres musculaires qu'il a représentées, sauf que dans les fibres qu'il figure il n'y a qu'un seul renflement, les fibres sont alors simplement fusiformes, comme ici les fibres obliques du Distome dans un certain nombre de cas[3]. Dans les fibres longitudinales et transversales ainsi que dans certaines fibres obliques du réseau musculaire, il y a un grand nombre de ventres musculaires; les fibres sont ici moniliformes. Il faut en tout cas distinguer avec soin cette forme en fuseau ou en chapelet, dont la cause est purement physiologique, de l'aspect fusiforme réellement anatomique que présentent les fibres musculaires, dites fibres-cellules[4].

Il semble donc que sur une préparation de tégument de *Distomum rufoviride,* après traitement par le bichromate de potasse, il y ait deux types de fibres musculaires assez différents : des fibres larges, aplaties, et des fibres cylindriques plus étroites.

Cependant sur des préparations obtenues à l'aide de l'acide osmique à $^1/_{100}$ et colorées à la safranine, l'aspect n'était plus tout à fait le même, et la distinction entre les deux ordres de fibres

1. On observe tous les intermédiaires entre des renflements où l'aspect nucléiforme est très prononcé et des renflements bien évidemment dus à une contraction musculaire.

2. R. Kœhler, *Recherches sur les Échinides des côtes de Provence.* Marseille, 1883. (Pl. VI, fig. 39.)

3. M. Poirier a observé et figuré les mêmes dispositions. [Poirier, *Contribution à l'histoire des Trématodes.* (*Arch. de zool. exp.,* 1885.)]

4. Il serait possible, en raison de la régularité avec laquelle ces ventres se présentaient toujours sur les fibres que j'ai examinées, qu'il y eût ici plus qu'un état physiologique de la fibre musculaire et que ce fût là une disposition constante, indépendante du fonctionnement. Les deux interprétations sont aussi hypothétiques l'une que l'autre; mais comme la première est la plus accréditée, c'est elle qui doit être mise au premier rang.

s'affaiblissait beaucoup. Les fibres pâles et aplaties se dissociaient pour ainsi dire en nombreuses fibrilles assez réfringentes, dont chacune était de quatre à cinq fois plus petite que la fibre appartenant à l'autre type musculaire qui a été décrit. Les fibres aplaties et larges paraissent donc comme un ruban constitué de fibrilles fines parallèlement dirigées, qui sont les unités du ruban. La fibre cylindrique est au contraire elle-même une unité musculaire, d'un calibre supérieur, il est vrai, à celui des unités constitutives du ruban.

Comme l'acide osmique passe pour traduire le mieux l'état de la réalité, c'est évidemment l'aspect obtenu à l'aide de l'acide osmique qui doit être mis en avant, et préféré à celui qu'a fourni le bichromate.

Enfin, sur une semblable préparation des téguments, on voit la couche granuleuse, dont l'existence et la situation ont été reconnues déjà sur une coupe transversale des téguments. Cette couche est répandue sur toute la surface interne de l'enveloppe cutanée. En certains points elle est plus épaisse ; et au niveau de ces amas de substance granuleuse se trouvent les noyaux de cette couche. Tantôt ces noyaux sont isolés, et alors ils sont volumineux, pourvus d'un gros nucléole. D'autres fois ils sont nombreux, formant de petits nids ; dans ce cas, ils sont petits et peuvent même devenir punctiformes à un grossissement de 300 d., très nets cependant, grâce à la coloration intense que leur communique le picrocarmin. Il est à remarquer que ces amas nucléés se trouvent dans les mailles du réseau musculaire, et ne sont presque jamais à cheval sur les fibres de ce réseau. (Pl. II, fig. 3, *cg.*)

Cette structure des téguments se retrouve dans l'ampoule excrétrice qui n'est qu'un prolongement du tégument, mais avec quelques modifications. La couche granuleuse et nucléée, beaucoup plus épaisse ici que dans le tégument externe, est extrêmement riche en petits noyaux qui, sur une coupe transversale ou longitudinale, se montrent disposés en files radiales entre lesquelles se trouvent des fibres musculaires. (Pl. II, fig. 1.) C'est surtout l'ampoule excrétrice qui a donné les différences les plus sensibles, dans des préparations faites à l'aide du bichromate de

potasse, entre les deux sortes de fibres musculaires dont il a été plus haut question. (Pl. II, fig. 4.) De plus, les fibres musculaires de cette paroi de l'ampoule qui sont le plus externes et qui par conséquent sont en contact avec le parenchyme sont très souvent simplement fusiformes, ou quelquefois émettant par leurs extrémités ou même leurs faces latérales des prolongements pointus. Il semble que l'on ait devant soi des fibres en voie de développement. (Pl. II, fig. 4, *f'''*.)

D'autres organes présentent une musculature qui ressemble à celle des téguments et de l'ampoule excrétrice. Ainsi la poche du cirrhe se montre pourvue de fibres larges et aplaties, ramifiées et même anastomosées entre elles, et de fibres cylindroïdes. L'oviducte présente une disposition analogue. L'intestin offre dans sa paroi des fibres cylindriques formant un réseau à mailles rectangulaires. Dans les ventouses (Pl. II, fig. 5) et le bulbe pharyngien, on trouve de larges fibres très puissantes qui doivent être rattachées au système de fibres aplaties que les téguments et surtout l'ampoule excrétrice nous ont montrées. Les fibres cylindroïdes manquent dans les ventouses. Entre ces fibres se trouvent des espaces étroits remplis d'une substance granuleuse. En certains points, ces espaces s'élargissent, déprimant légèrement les fibres musculaires à leur niveau ; en ces points se voit un gros noyau, quelquefois prolongé à l'un de ses pôles ; ou bien, au lieu d'un noyau volumineux et unique, c'est un amas de nombreux petits noyaux que l'on observe.

Si nous cherchons la signification des éléments divers qui entrent dans la constitution des téguments du *Distomum rufoviride*, voici, à notre sens, ce qu'il faut penser de ces éléments.

Les fibres que nous avons décrites dans l'enveloppe cutanée, nous les avons appelées tout de suite musculaires. Ce que l'on sait de la musculature des autres Trématodes ne nous a pas permis de douter de leur nature musculaire. Elles offrent d'ailleurs vis-à-vis de la potasse à $^{40}/_{100}$, de l'acide nitrique à $^{20}/_{100}$, qui les ménagent, du picrocarmin qui les colore légèrement en rose, les réactions de la substance musculaire.

Quant à la distinction que nous avons établie d'après la forme et l'aspect de ces fibres traitées par les bichromates, nous avons

vu qu'elle disparaît ou s'atténue dans des préparations faites à l'aide de l'acide osmique. Mais après l'action de ce réactif, si les différences extérieures de forme ont disparu, si nous n'avons plus devant nous, d'une part, des fibres larges et aplaties et, de l'autre, des fibres cylindroïdes, c'est que les fibres larges se sont dissociées en leurs éléments constitutifs, des fibrilles légèrement renflées de distance en distance, dont la réunion en rubans constitue la fibre large. Ces fibrilles sont donc, dans la fibre large, les unités dissociables par les réactifs. Dans la fibre cylindroïde, la dissociation ne donne aucun résultat ; la fibre cylindroïde reste unité musculaire. Mais c'est une unité beaucoup plus grossière (trois ou quatre fois plus épaisse) que l'unité musculaire de la fibre large. Une loi commande la structure de la substance musculaire. Elle a été formulée par M. Ranvier, et trouve son application ici. Plus une fibre musculaire est découpée, soit en long, soit à la fois en long et en travers, et plus les tronçons sont petits, plus la contraction est rapide. Or nous avons vu que dans les téguments ces fibres larges à fibrilles étroites sont mal représentées ; au contraire, le réseau de fibres cylindroïdes, fibrilles épaisses, est bien développé ; et il en est de même dans l'intestin, dans l'oviducte. La présence dans ces parties d'éléments musculaires à structure grossière n'est-elle pas en harmonie avec la contractilité peu développée de ces organes, avec la lenteur que l'animal met à changer la forme de son corps, contractant d'une façon prédominante, tantôt celles des fibres du réseau musculaire qui ont une direction longitudinale, tantôt celles qui s'étendent transversalement ? Au contraire, l'ampoule excrétrice, le pharynx, les ventouses, toutes parties dont la contraction doit être brusque et rapide, présentent des fibres larges, à structure délicate, très développées (ampoule excrétrice, poche du cirrhe), ou bien même des fibres larges à l'exclusion des autres (pharynx, ventouses). Ces organes sont des dépendances des téguments, spécialisées dans leurs attributions physiologiques qui sont surtout une contractilité instantanée et puissante. Cette spécialisation physiologique est expliquée par une spécialisation histologique : le développement des muscles à structure délicate.

Ce sont peut-être là des raisons qui sont de nature à justifier

la distinction en deux sortes que j'ai introduite dans les muscles du *Distomum rufoviride*.

Les fibres cylindroïdes sont assez caractéristiques de la musculature du Distome du congre. Cependant on peut les rapprocher de celles décrites par Schwalbe[1] et des cellules musculaires que M. Kœhler a vues chez les Échinodermes[2]. Quant aux fibres aplaties et larges, elles sont répandues très généralement. Ce qui est surtout ici digne d'attirer l'attention, c'est évidemment la coexistence de ces deux sortes de fibres et leur répartition.

Au sujet de la couche granuleuse et nucléée que l'on observe tant entre et sous les muscles du tégument qu'entre ceux des ventouses et d'autres organes, voici quelle signification morphologique je suis disposé à lui reconnaître et comment j'ai été conduit à le faire.

Sæfftigen[3] a représenté, chez les Échinorhynques, des téguments vus de face. Ces téguments se montrent constitués : de fibres musculaires, et d'une couche que l'auteur désigne du nom de *Marksubstanz*, et qui se compose de cellules qui ne sont pas absolument distinctes les unes des autres, mais dont les noyaux très gros indiquent nettement l'existence et le nombre. Cette *Marksubstanz* est considérée par l'auteur comme la matrice des muscles ; en d'autres termes, les cellules qui la constituent sont des cellules musculaires, différenciées en substance musculaire dans une partie seulement de leur protoplasma.

J'ai eu l'occasion de contrôler plusieurs résultats anatomiques et histologiques avancés par Sæfftigen et d'en reconnaître l'exactitude. En particulier j'ai obtenu des préparations de téguments d'Échinorhynques qui m'ont fourni les mêmes images que celles que l'auteur représente.

La ressemblance de telles préparations avec celles que donne le *D. rufoviride* est grande. Et j'ai été ainsi porté à regarder comme étant de nature musculaire la couche granuleuse et nucléée du Distome. Cependant entre la matrice musculaire des Échinorhynques et celle du Distome, il y a une différence. Dans

1. Schwalbe, *Arch. f. Micr. Anat.*, t. V, 1869.
2. Kœhler, *loc. cit.*
3. Sæfftigen, *Zur Organisation der Echinorhynchen*. Leipzig, 1884.

les Échinorhynques, les cellules musculaires, bien que confluentes en certains points par leur protoplasma, sont assez bien délimitées cependant pour qu'on puisse les reconnaître sur des vues de face, ou mieux encore sur des coupes longitudinales ou transversales de l'animal. Sur de telles coupes on verra la cellule musculaire munie d'un noyau volumineux et portant appendue à l'un de ses côtés la bande de tissu musculaire, la fibre musculaire qu'elle a produite. Mais quelque séparables que soient par la pensée, quelque séparés même que paraissent à l'œil de l'observateur ces éléments musculaires des Échinorhynques, leur dissociation par les procédés histologiques est impossible, tout à la fois parce que la partie protoplasmique de l'élément est unie par des ponts anastomotiques avec les parties protoplasmiques des éléments voisins, et parce que, d'autre part, la fibre musculaire qui en dépend fait corps avec des fibres musculaires des cellules contiguës, ces fibres formant toutes ensemble un réseau très cohérent dont la cohésion est renforcée encore par un sarcolemme qui passe sans interruption d'une fibre à l'autre. Aussi la dissociation n'a-t-elle pas été tentée par Sæfftigen qui la regardait certainement comme irréalisable.

L'isolation d'un élément musculaire, avec ses deux parties constitutives, la portion trophique non différenciée et celle qui l'est en substance musculaire, est encore moins à rechercher chez le *D. rufoviride*. Ici les cellules musculaires, munies, les unes de noyaux volumineux et uniques, les autres de petits amas nucléaires, sont complètement confondues par leur protoplasma ; elles n'existent pas comme distinctes ; l'individualisation cellulaire est nulle. C'était dans le but de faciliter l'exposition que je me suis servi du mot cellule que je n'avais pas le droit d'employer. Il n'y pas ici une matrice musculaire composée de cellules toutes distinctes ou pouvant être distinguées ; il y a une assise protoplasmique musculogène qui n'est pas à l'état cellulaire. Quand s'est faite la différenciation musculaire, nous ne pouvons pas penser que l'activité indépendante de certains éléments que nous appellerions cellules soit intervenue ; ou s'il y a dans cette couche des unités musculogènes, nous ne pouvons, avec nos moyens d'investigation, reconnaître quelles elles sont ; et nous sommes

réduit à dire que la formation des fibres s'est faite par une différenciation en bloc du protoplasma myogénétique.

Telles sont les considérations qui s'appuient sur la comparaison des téguments des Échinorhynques et du *D. rufoviride*.

En faisant des recherches bibliographiques sur les téguments des Trématodes, j'ai trouvé que cette idée avait été déjà brièvement exprimée par Salensky dans ses *Recherches sur la structure de l'Amphilina*[1]. Chez ce Trématode comme chez notre Distome, les muscles sont plongés dans une couche épaisse granuleuse et nucléée; l'ensemble forme sous la cuticule une *Hautschicht*. Cette couche granuleuse est surtout développée en dedans des muscles où elle forme une assise qui n'est que la condensation de la substance granuleuse et nucléée précitée, que l'auteur désigne, pour la clarté de la description seulement, d'un nom spécial : *Körnerschicht*. Salensky dit, au sujet de la substance granuleuse et nucléée dont la peau est comme infiltrée : « Le protoplasma de ces cellules a le rôle le plus évident dans la formation des fibres; » et plus loin : « Dans la *Hautschicht* on ne trouve pas d'éléments cellulaires distincts, mais seulement des noyaux avec nucléoles inclus. Aussi, je crois que la substance fibrillaire se développe principalement par une différenciation du protoplasma de la couche périphérique. »

Wierzewsky[2] figure les téguments du *Calicotyle Kroyeri*, et représente un réseau de fibres musculaires entre lesquelles sont des noyaux plongés dans une substance granuleuse. Il ne s'exprime d'ailleurs pas nettement sur la valeur morphologique de ces formations.

Dans les autres types qui ont été étudiés : le *Distomum Westermani* par Kerbert[3], la Douve du foie par Sommer[4] et M. Macé[5], la composition des téguments est toute différente, et l'on ne trouve rien de semblable à ce que présente le *D. rufoviride;* à moins toutefois que les éléments de la « couche cellulaire hypo-

1. Salensky, in *Zeitschrift für wiss. Zool.* 1874.
2. Wierzewsky, in *Zeitschrift für wiss. Zool.* 1877.
3. Kerbert, *Arch. f. M. Anat.*, t. XIX.
4. Sommer, *Zeitschrift für wiss. Zool.* 1880.
5. Macé, *Recherches anatomiques sur la grande douve du foie.* 1882.

dermique », disposés par amas distincts à la face interne des muscles, ne soient chez la Douve du foie les représentants des amas nucléaires de la couche granuleuse de notre Distome [1].

D'autres parties que les téguments proprement dits permettent d'émettre une opinion semblable sur la genèse du tissu musculaire. Entre les faisceaux radiés de la ventouse ventrale, par exemple, se trouve une substance granuleuse renfermant des nids de petits noyaux ou bien de gros noyaux isolés. Les dispositions sont sensiblement celles que l'on observe dans les téguments. Ici comme là, la couche granuleuse est une matrice musculaire dont les éléments cellulaires ne sont pas individualisés, et dont les noyaux seuls sont distincts. Je dois faire remarquer que dans les ventouses, et peut-être même à la face interne des téguments, parmi ces noyaux, on en trouve quelques-uns qui offrent un aspect tout spécial; ils sont elliptiques; et du protoplasma qui les entoure immédiatement partent des prolongements. Ce sont ces formations, sur lesquelles je n'ai pas porté spécialement mon attention, qui représentent, chez *D. rufoviride*, les éléments regardés autrefois par Leuckardt comme des glandes unicellulaires,

1. M. Macé, frappé de l'aspect jeune de ces éléments, les a considérés comme « destinés à fournir les éléments nécessaires à l'accroissement des différentes couches » des téguments. Ainsi donc, la signification que nous accorderions à ces éléments serait incluse dans celle que M. Macé leur reconnaît, et qui est seulement plus compréhensive que la nôtre.

M. Poirier, dans le travail considérable qui est cité plus haut, décrit de ces cellules chez plusieurs Distomes, et surtout chez le *D. clavatum*. Il ne s'explique pas sur la nature de ces éléments, qu'il paraît disposé à considérer comme cellules connectives, et auxquels il refuse en tout cas la nature musculaire. Pour M. Poirier, en effet, les fibres musculaires des Trématodes sont tout à fait analogues, par leur mode de développement et par leur aspect à l'état jeune, aux fibres lisses des animaux supérieurs (Pl. XXV, fig. 4); elles se forment par différenciation périphérique du protoplasma, dont une faible partie seulement, entourant le noyau, reste centrale et non transformée. Pour Salensky, M. Macé, dans les muscles dorso-ventraux de l'*Amphilina* et du *D. hepaticum*, la différenciation musculaire du protoplasma est unilatérale; la cellule formatrice reste en dehors de la bande musculaire qu'elle a produite, appendue à elle. Bien que l'isolation, dans les téguments, d'éléments fournissant les mêmes images soit un fait reconnu impossible par les auteurs cités plus haut, le mode de formation de ces muscles cutanés est le même que celui des muscles dorso-ventraux, sans aucun doute. On a vu pourquoi dans le *D. rufoviride* cette dissociation des muscles tegumentaires et, par suite, la constatation de leur mode exact de formation ne peuvent être faites.

par MM. Villot et Macé comme des coupes de canaux excréteurs, par Stieda, Sommer[1] comme des cellules nerveuses.

Des dissemblances très frappantes existent dans les descriptions que les auteurs donnent de la structure des téguments chez les Trématodes. Cela paraît tenir et à des interprétations différentes de la part des auteurs, et à des différences réelles existant entre les espèces observées[2]. On a des raisons de croire que les Trématodes ne sont que des Turbellariés modifiés par le parasitisme, et d'une manière assez uniforme pour qu'on ait pu en faire un groupe très homogène fondé sur les caractères extérieurs. Mais sous cette ressemblance apparente, il y a une structure très diversifiée, attestant l'origine variée des Trématodes. Il serait intéressant de rechercher pour quelques appareils, par exemple pour l'appareil musculo-cutané, dans quelles limites il peut varier, lorsqu'on l'examine chez des Trématodes habitant dans les mêmes conditions, par suite modifiés semblablement par le parasitisme, et que nous avons toutes raisons de croire, à ne regarder que leur aspect extérieur, comme étant très proches parents. L'étude pourrait être faite sur les petits Trématodes qui habitent l'intestin de la grenouille (*D. retusum, D. crassicolle*). On pourrait ainsi non pas certes songer à substituer au groupement zoologique un groupement anatomo-histologique; mais on pourrait, par l'étude des caractères anatomo-histologiques, essayer la valeur du groupement zoologique.

CONCLUSIONS.

Les conclusions qui me paraissent découler des faits statistiques que j'ai observés peuvent être :

1° La distribution géographique d'un ver parasite a pour facteurs, celle du poisson son hôte et celle de la pâture de cet hôte;

2° Les parasites réputés habituels, constants, et même caractéristiques d'une espèce de poisson donnée, peuvent ne l'être que

1. Et M. Poirier.

2. M. Poirier émet quelque part l'idée que cette structure si différente chez les divers Trématodes doit être due à la provenance très diverse de ces Trématodes.

lorsqu'on considère les poissons de cette espèce dans une région déterminée ;

3° Une nouvelle espèce de Filaire a été trouvée, qui habite la cavité branchiale et même les artères branchiales du brochet.

Les résultats anatomo-histologiques qui sont ci-dessus exposés sont :

1° La description d'une filaire nouvelle ;

2° Si *Acanthobothrium Dujardinii* et *A. coronatum* sont des espèces distinctes, elles ne diffèrent pas par la forme des crochets ;

3° Les crochets sur la trompe du *Tetrarhynchus erinaceus* ne sont pas homéomorphes ;

4° L'appareil excréteur du *Distomum tereticolle* a été figuré ;

5° Les téguments et leurs dépendances (ventouses, par exemple) chez *Distomum rufoviride* présentent des muscles qui sont de deux sortes histologiques et surtout physiologiques ; l'une de ces sortes est représentée par des fibres cylindroïdes disposées en réseau. Ces muscles sont produits par une assise granuleuse et nucléée dans laquelle des noyaux seuls représentent l'état cellulaire.

EXPLICATION DES PLANCHES

PLANCHE I.

Fig. I. A. — *Filaria obturans*. Extrémité antérieure. *œ*, œsophage ; *i*, intestin ; *u*, utérus ; *v*, vagin ; *p*, pore sexuel. Gross., 30 d.

Fig. I, B. — *Filaria obturans*. Extrémité postérieure. *r*, rectum ; *g*, ganglion anal.

Fig. II. — *Acanthobothrium Dujardinii* (scolex). Gross., 30 d.

Fig. III. — Crochets du même. Gross., 170 d.

Fig. IV. — *Distomum tereticolle*. *ph*, pharynx ; *ph'*, diverticule impair et borgne du pharynx ; *i*, *i*, branches intestinales ; *t*, *t*, les deux testicules ; *g*, germigène ; *v*, *v*, vitellogène ; *u*, utérus ; *cs*, cloaque sexuel ; *pg*, glandes annexes de l'appareil génital mâle ; *e*, branche impaire de l'appareil excréteur, se bifurquant en avant du testicule postérieur. Gross., 20 d.

Fig. V. — *Tetrarhynchus erinaceus*. Trompe (partie supérieure). Gross., 170 d.

PLANCHE II.

Fig. I. — *Distomum rufoviride*. Coupe longitudinale. *t*, *t*, les deux branches du tube digestif ; *v*, *v'*, les deux ventouses ; *clc*, cloaque génital ; *gl*, glandes accessoires unicellulaires ; *tt*, testicule ; *vi*, vitellogène ; *a*, ampoule excrétrice ; *p*, pore excréteur. Gross., 30 d. Alcool. C. de Grenacher.

Fig. II. — *Distomum rufoviride*. Téguments, coupe transversale. *a*, cuticule ; *b*, muscles longitudinaux et annulaires ; *c*, couche granuleuse avec épaississements nucléés. (Alcool, carmin de Grenacher.) Gross., 300 d.

Fig. III et IV. — Fig. III, vue de face des téguments. Fig. IV, vue de face de l'ampoule excrétrice. *f*, fibres larges, pâles ; *f'*, fibres cylindroïdes, réfringentes, formant en III et IV un réseau à mailles rectangulaires qui est, dans les deux figures, le plus régulier qui ait été observé ; *f''*, fibres obliques moniliformes ou fusiformes ; *f'''*, les mêmes dans l'ampoule excrétrice, fusiformes ou multifurquées ; *cg*, couche granuleuse et nucléée (*Marksubstanz*).

N. — Dans la figure III (téguments), les fibres larges, *f*, n'ont pas été représentées ; elles l'ont été dans l'ampoule excrétrice, où elles sont bien mieux développées (fig. IV). Pour des raisons inverses, la couche granuleuse et nucléée de l'ampoule excrétrice n'a pas été figurée ; très épaisse (voy. fig. 1, *a*), elle eût trop obscurci le dessin.

Bichr. K. $^1/_{100}$, picrocarminate. Gross., 300 d.

Fig. V. — Secteur de la ventouse ventrale, appartenant à une coupe longitudinale. *f*, fibres larges ; *cg*, la substance granuleuse avec ses gros noyaux et ses nids de petits noyaux. Bichr. K. $^1/_{100}$. Alcool. Carmin de Grenacher. Gross., 300 d.

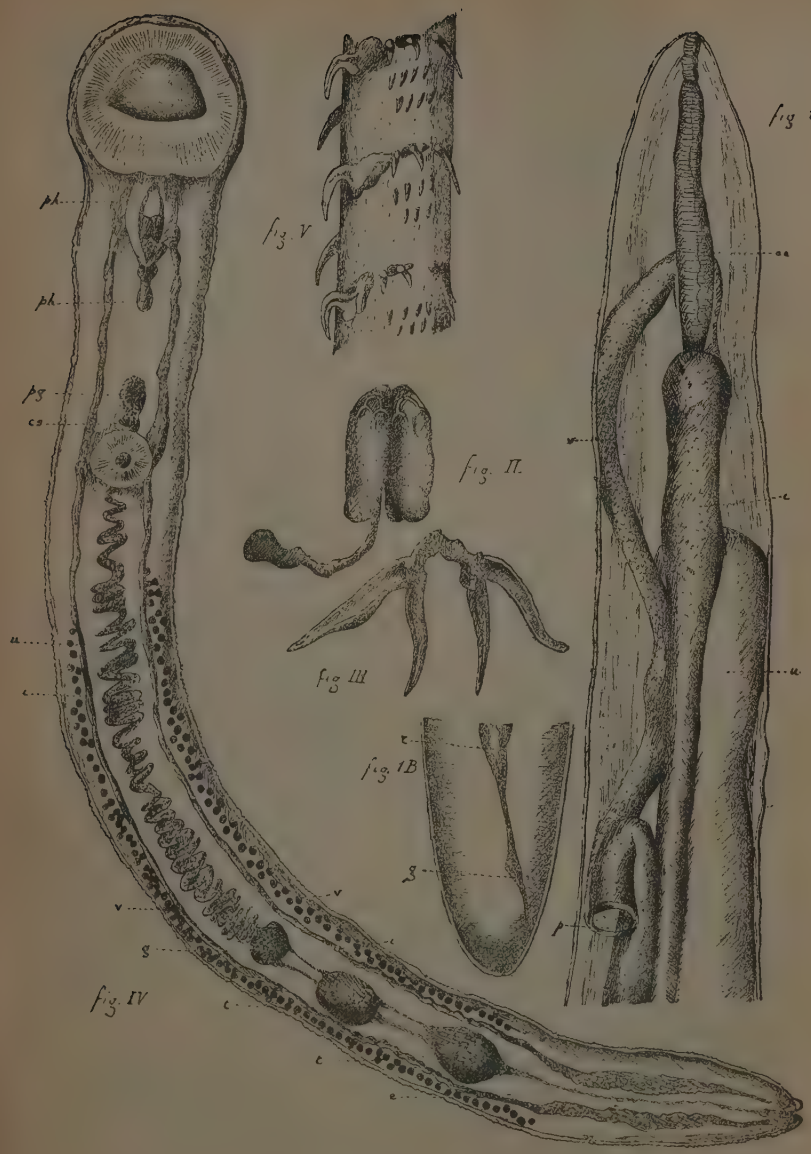


fig. V
fig. 1A
fig. II.
fig. III
fig. 1B
fig. IV
ph.
ph.
pg.
cs.
u.
t.
v.
g.
c.
t.
e.
oe.
v.
t.
u.
t.
g.
p.

Planche I.

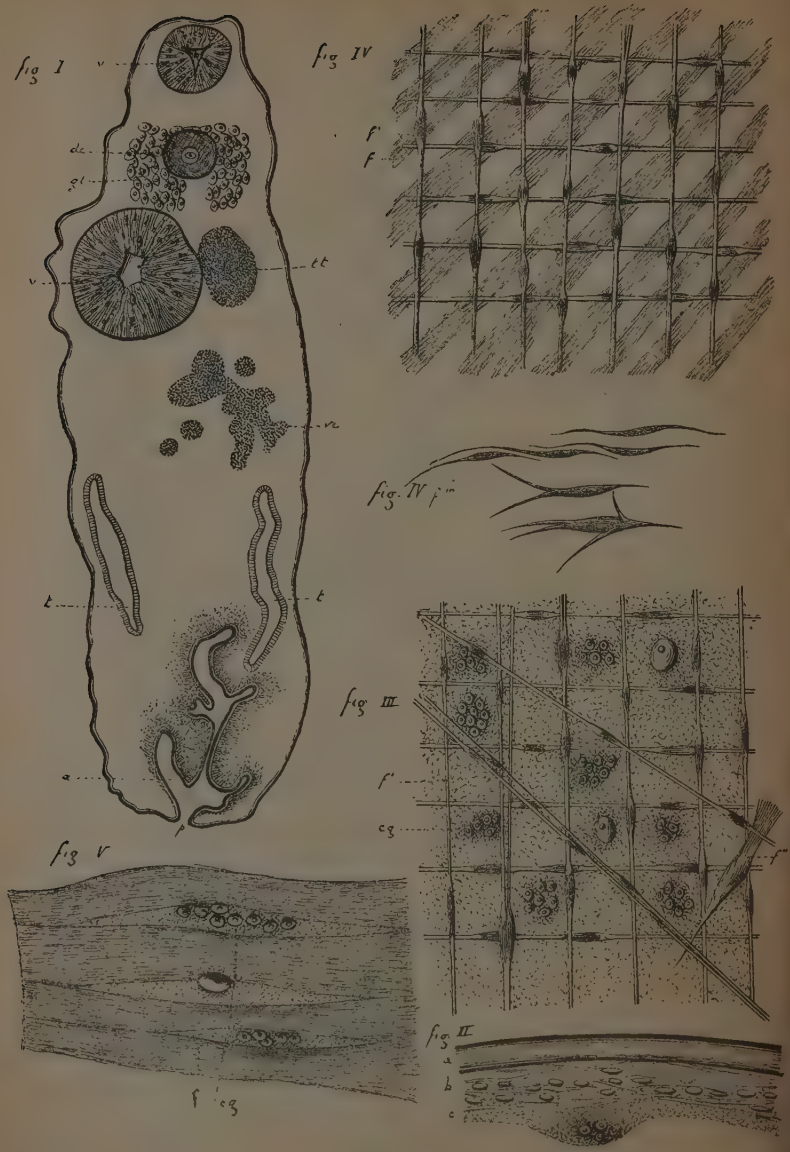


fig I
v
dc
gl
tt
v
m
t
t
a
p
fig IV
f'
f
fig. IV f''
fig III
f'
cg
f''
fig V
f cg
fig II
a
b
c

Planche II.

SOCIÉTÉS CORRESPONDANTES.

AMIENS. — Société linnéenne du Nord de la France.
— Société industrielle d'Amiens.
AMSTERDAM. — Koninklijke Akademie der Wetenschappen (Académie royale des sciences).
ANGERS. — Société d'études scientifiques d'Angers.
— Société industrielle et agricole d'Angers et du département de Maine-et-Loire.
BALE. — Naturforschende Gesellschaft in Basel.
BATAVIA. — Bataviaasch Genootschap van Kunsten en Wetenschappen (Société des arts et sciences de Batavia).
BERLIN. — Kœniglich Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
— Deutsche Geologische Gesellschaft.
BERNE. — Naturforschende Gesellschaft in Bern.
— Schweizerische naturforschende Gesellschaft.
BESANÇON. — Société d'émulation du Doubs.
— Société de médecine de Besançon.
BÉZIERS. — Société d'études des sciences naturelles de Béziers.
BONN. — Naturhistorischer Verein der preussischen Rheinlande und Westfalens.
BORDEAUX. — Société linnéenne de Bordeaux.
— Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux.
BOSTON. — American Academy of Arts and Sciences de Boston (Massachussets).
BRESLAU. — Schlesische Gesellschaft für vaterländische Cultur.
BRUNN. — Naturforschender Verein in Brünn.
BRUXELLES. — Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique.
CAEN. — Académie nationale des sciences, arts et belles-lettres de Caen.
— Société linnéenne de Normandie.
CHEMNITZ (Saxe). — Naturwissenschaftliche Gesellschaft zu Chemnitz.
CHERBOURG. — Société nationale des sciences naturelles de Cherbourg.
COIRE. — Naturforschende Gesellschaft Graubündens.
COLMAR. — Société d'histoire naturelle de Colmar.
COPENHAGUE. — Kongelige danske videnskaberne selskab Kjöbenhavn (Société royale danoise des sciences).
DANZIG. — Naturforschende Gesellschaft in Danzig.
DUBLIN. — Royal geological Society of Ireland.
ÉPINAL. — Société d'émulation du département des Vosges.
FRIBOURG. — Naturforschende Gesellschaft zu Freiburg im Breisgau (grand-duché de Bade).
GIESSEN. — Oberhessische Gesellschaft für Natur- und Heilkunde.

Gœrlitz (Silésie). — Naturforschende Gesellschaft zu Gœrlitz.
Guéret. — Société des sciences naturelles et archéologiques de la Creuse.
Hambourg-Altona. — Wissenschaftlicher Verein von Hamburg-Altona.
Harlem. — Hollandsche Maatschapij der Wetenschappen (Société hollandaise des sciences).
Havre (Le). — Société des arts agricoles et horticoles du Havre.
Helsingfors. — Vetenskaps-Societetens af Finska Société des sciences de la Finlande).
— Sällskapets pro Faunâ et Florâ fennicâ (Société pour la faune et la flore de la Finlande).
Inspruck. — Ferdinandeum für Tyrol und Vorarlberg.
Lausanne. — Société vaudoise des sciences naturelles.
Leipsick — Königlich Sächsische Gesellschaft der Wissenschaften in Leipzig.
Liège. — Société géologique de Belgique.
Lisbonne. — Academia real das sciencias de Lisboa.
Londres. — Royal geographical Society.
— Royal geological Society.
Luxembourg. — Institut royal grand-ducal de Luxembourg (Section des sciences naturelles et mathématiques).
Lyon. — Société d'études scientifiques de Lyon.
Manchester. — Litterary and philosophical Society of Manchester.
Marseille. — Société d'études des sciences naturelles de Marseille.
Metz. — Société d'histoire naturelle de Metz.
Montbéliard. — Société d'émulation de Montbéliard.
Montpellier. — Académie des sciences et lettres de Montpellier (Section des sciences).
Montréal. — Society of natural history of Montreal (Canada).
Moscou. — Société impériale des naturalistes de Moscou.
Munich. — Königlich Baierische Akademie der Wissenschaften (mathem. u. physik. Abth.).
Munster. — Westfälischer Provinzial-Verein für Wissenschaft und Kunst.
Nancy. — Académie de Stanislas.
— Société de médecine.
— Société de géographie de l'Est.
— Commission météorologique du département de Meurthe-et-Moselle.
Neuchatel. — Société des sciences naturelles de Neuchâtel (Suisse).
Nimes. — Société d'études des sciences naturelles de Nimes.
Offenbach. — Verein für Naturkunde in Offenbach a/Main.
Paris. — Association française pour l'avancement des sciences.
Perpignan. — Société agricole, scientifique et littéraire des Pyrénées-Orientales.
Philadelphie. — Akademy of natural sciences of Philadelphia (Pensylvanie).
Pise. — Società toscana di scienze naturali in Pisa.
Prague. — Königlich Böhmische Gesellschaft der Wissenschaften in Prag.
Presbourg. — Verein für Natur- und Heilkunde zu Pressburg.
Rio-de-Janeiro — Observatoire impérial astronomique et météorologique.
Rome. — Accademia reale dei Lincei.
Rouen. — Société des Amis des sciences naturelles de Rouen.
Saint-Dié. — Société philomathique vosgienne de Saint-Dié.
Saint-Gall. — St. Gallische naturwissenschaftliche Gesellschaft.
Saint-Jean-d'Angély. — Société linnéenne de la Charente-Inférieure.

Saint-Louis. — Academy of sciences of Saint-Louis (Missouri).
Saint-Pétersbourg. — Académie impériale des sciences de Saint-Pétersbourg.
Stockholm. — Kong. Svenska Vetenkaps Akademie (Académie royale suédoise des sciences).
Toulouse. — Académie des sciences, inscriptions et belles-lettres de Toulouse.
— Société d'histoire naturelle de Toulouse.
— Société académique hispano-portugaise.
Tours. — Société d'agriculture, sciences, arts et belles-lettres du département d'Indre-et-Loire.
Turin. — Accademia Reale delle Scienze.
Upsal. — Regia societas scientiarum Upsaliensis.
— Université d'Upsal.
Verdun. — Société philomathique de Verdun.
Versailles. — Société des sciences naturelles et médicales de Seine-et-Oise.
Vienne. — Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien (mathemat. u. wissenschaftliche Abth.).
— Kaiserl. Königl. zoologische und botanische Gesellschaft in Wien.
Vitry-le-François. — Société des sciences et arts de Vitry-le-François.
Washington (D. C. U. S. A.). — Smithsonian Institution.
Wiesbaden. — Nassauischer Verein für Naturkunde.
Zurich. — Naturforschende Gesellschaft in Zürich.

OUVRAGES

REÇUS PAR LA SOCIÉTÉ PENDANT L'ANNÉE 1885.

I. — Publications périodiques et journaux.

Amiens. — Bulletin mensuel de la Société linnéenne du Nord de la France. T. VI, nos 123 à 138.

— Bulletin de la Société industrielle, 1885, 5e fasc.

Amsterdam. — Verslagen en Mededeelingen der Koninklijke Akademie van Wetenschappen.

Angers. — Bulletin de la Société d'études scientifiques, 1884.

Bale. — Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft in Basel. 7ter T. 3tes H.

Batavia. — Natuurkundig Tijdschrift voor Nederlandsch-Indië. D. XLIX.

— Catalogus der Bibliotheck van de Konin. Natuurkundige vereeniging in Nederlandsch-Indië.

Berlin. — Sitzungsberichte der königl. preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 23 octobre 1884-30 juillet 1885.

Berne. — Mittheilungen der naturforschenden Gesellschaft in Bern. 1884 : 1092-1101 ; 1885 : 1103-1132.

Besançon. — Académie des sciences, belles-lettres et arts de Besançon. 1884.

Bonn. — Verhand. des naturhistorischen Vereines der preussischen Rheinlande und Westfalens. 1884, 2tes H.; 1885, 1tes H.

— Autoren und Sachregister zu Band 1-40. Jahrg. 1844-1883.

Bordeaux. — Actes de la Société linnéenne de Bordeaux. 38e vol. T. VIII, 4e série.

Boston. — Proceedings of the American Academy of arts and sciences. Mai 1884 à mai 1885.

Breslau. — Zweiundsechzigster Jahres-Bericht der Schlesischen Gesellschaft für vaterländische Cultur. 1884.

Brünn. — Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn. XXI. B. 1, 2. H. 1882.

Bruxelles. — Bulletin de l'Académie royale de Belgique. 3e série, t. V, VI, VII, VIII.

— Mémoires couronnés et autres mémoires de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. Collect. in-8°. T. XXXIV et XXXV.

— Mémoires couronnés et mémoires des savants étrangers de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. T. XLV et XLVI.

— Mémoires de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. T. XLV.

Bruxelles. — Annuaire de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique. 1884.

Cherbourg. — Mémoires de la Société nationale des sciences naturelles et mathématiques de Cherbourg. T. XXIV. 4e vol., 3e série.

Coire. — Jahres-Bericht der naturforschenden Gesellschaft Graubündens. 1882-1883, 1883-1884.

Copenhague. — Bulletin de l'Académie royale. 1885, 1, 2, 3.

— Mémoires de l'Académie royale de Copenhague. 6e série, vol. I, n° 11; vol. II, n° 7; vol. III, nos 1 et 3.

Dantzig. — Schriften der naturforschenden Gesellschaft in Danzig. 1885.

Épinal. — Annales de la Société d'émulation des Vosges. 1885.

Fribourg-en-Brisgau. — Berichte über Verhandlungen der naturforschenden Gesellschaft. B. VIII, H. III.

Guéret. — Mémoires de la Société des sciences naturelles et archéologiques de la Creuse. T. V, 3e bulletin.

Harlem. — Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles. T. XIX, 4e et 5e liv.; t. XX, 1re et 3e liv.

Harrisbourg. — Second geological Survey of Pensylvanie. 75 volumes.

Helsingfors. — Bidrag Till Kämedom af Finlands natur och Folk. H. 39, 40, 41, 42.

— Öfversigt af Finska Vetenskaps Societetens Förhandlingar. XXVI.

— Meddelanden af Societas pro Fauna et Flora Fennica. 1883, 9 et 10; 1885, 11.

— Acta Societatis scientiarum Fennicæ. T. XIV.

Inspruck. — Zeitschrift des Ferdinandeums für Tirol und Vorarlberg. III. F., 29 H.

Lausanne. — Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles. 2e série, 20, 21.

Leipzig. — Berichte über die Verhandlungen der König. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. 1884 : I, II; 1885 : I, II.

Liège. — Annales de la Société géologique de Belgique. T. X, 1882-1883, avec tables générales des tomes I à X; t. XI, 1883-1884.

— Mémoires de la Société des sciences de Liège, t. XII.

Londres. — The quaterly Journal of the geological Society. V. XLI, n° 162.

Lucerne. — Verhand. der Schweizerischen naturforschenden Gesellschaft in Luzern. Jahr. 1883-1884.

Montpellier. — Mémoires de la section des sciences de l'Académie de Montpellier. T. X, 3e fasc., 1883-1884.

Moscou. — Bulletin de la Société impériale des naturalistes de Moscou. 1884, nos 3, 4.

Munich. — Sitzungsberichte der mathematisch-physikalischen Classe der k. B. Akademie der Wissenschaften zu München. 1885. H. I, II, IV.

— Sitzungsberichte der philosophisch-philologischen und historischen Classe. 1885. H. I.

— Abhandlungen der mathematisch-physikalischen Classe der königlich bayerischen Akademie der Wissenschaften. XV. B.

Münster. — Dreizehnter Jahresbericht des westfälischen Provinzial-Vereins für Wissenschaft und Kunst für 1884.

Nancy. — Mémoires de l'Académie de Stanislas. 1884.

— Bulletin de la Société de géographie de l'Est. 1885, 1er, 2e, 3e trim.

— Mémoires de la Société de médecine. 1883-1884.

Nancy. — Observations météorologiques de la Commission de Meurthe-et-Moselle. 1884.

— *Revue médicale de l'Est.* 1885.

Nimes. — Bulletin de la Société d'étude des sciences naturelles de Nîmes. 1885. 3e fasc.

Offenbach. — 24. und 25. Bericht über die Thätigkeit des Offenbacher-Vereins für Naturkunde.

Paris. — Revue des travaux scientifiques. T. V, 1 à 7, 11e et 12e fasc.

— Comité des travaux historiques et scientifiques (Liste des membres).

— Revue des Sociétés savantes : sciences mathématiques, physiques et naturelles (Table générale).

Philadelphie. — Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia. 1885, 3 p.

Pise. — Atti della Società Toscana di Scienze naturali in Pisa. Vol. IV, fasc. 3; vol. VI, fasc. 2. (Processi-verbali, vol. IV, 22 mazo et 28 guigno 1885.)

Rome. — Atti della reale Accademia dei Lincei. 1884-1885, nos 3 à 27.

Rouen. — Bulletin de la Société des amis des sciences naturelles de Rouen. 1884, 2e sem.; 1885, 1er sem.

Saint-Dié. — Bulletin de la Société philomathique vosgienne. 1884-1885.

Saint-Gall. — Bericht über die Thätigkeit der Sankt-Gallischen naturwissenschaftlichen Gesellschaft. 1882-1883.

Saint-Pétersbourg. — Mémoires du Comité géologique. Vol. I, nos 1-4; vol. II, n° 1.

— Bulletin du Comité géologique. 1882, 1; 1883, 1 à 9; 1884, 1 à 10; 1885, 1 à 7.

Stockholm. — Ofversigt of kongl. Vetenskaps Akademiens Forhandlingar, 38, 39, 40.

— Bihang till kongl. Swenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar. 6e, 1, 2; 7e, 2; 8e 1.

— Kongliga Svenska Vetenskaps-Akademiens Handlingar. 1880, 18; 1881, 19. I, II.

Toulouse. — Bulletin de la Société d'histoire naturelle de Toulouse. 1885, 1er et 2e trim.

— Mémoires de l'Académie des sciences, inscriptions et belles-lettres de Toulouse. T. VI, 1er et 2e sem.

— Bulletin de la Société académique franco-hispano-portugaise de Toulouse. T. V, 1884, nos 3, 4; t. VI, 1885, n° 1. — Annuaire de la Société, 1884-1885.

Upsal. — Nova Acta Regia Societatis scientiarum Upsaliensis. Vol. XII, fasc. II, 1885.

Vienne. — Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Anatomie, Médecine et Physiologie. 1883, avril à décembre; 1884, janvier et février. — Minéralogie, Botanique, Zoologie, Géologie et Paléontologie. 1883, juin à décembre; 1884, janvier à mai. — Mathematik, Physik, Chemie, Mechanik, Meteorologie und Astronomie. 1883, juin à décembre; 1884, janvier à mai.

— Verhandlungen der Kaiserlich-Königlichen zoologisch-botanischen Gesellschaft in Wien. XXIV, XXV.

Vitry-le-François. — Société des sciences et arts de Vitry-le-François. XII, 1882.

Zurich. — Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich. 1881, 1882, 1883, 1884.

II. — Ouvrages originaux.

Fliche et Bleicher. — Recherches sur le terrain tertiaire d'Alsace et du territoire de Belfort.

Faudel et Bleicher. — Matériaux pour une étude préhistorique de l'Alsace.

Thomas. — Recherches stratigraphiques et paléontologiques sur quelques formations d'eau douce de l'Algérie.

— La Mer saharienne.

— Recherches sur les sépultures anciennes des environs d'Aïn-el-Bey (près de Constantine, Algérie).

— Recherches sur les Bovidés fossiles de l'Algérie.

Ed. Lefèvre. — Liste des Coléoptères recueillis en Tunisie en 1883.

Eugène Simon. — Étude sur les Arachnides recueillis en Tunisie en 1883 et 1884.

P. Vuillemin. — Tige des Composées.

Olry. — Recherches sur les phénomènes météorologiques de la Lorraine.

H. Vignot. — Rôle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Gal D. Julio A. Roca. — Expédition du Rio-Negro (Patagonie) [géologie, zoologie et botanique].

A. Prêterre. — Les Dents, leurs maladies, leur traitement et leur remplacement.

Carte de l'Algérie et de la Tunisie publiée par l'Association française pour l'avancement des sciences.

Congrès tenu à Blois par l'Association française pour l'avancement des sciences (13e année, 1884).

Octave Pirmez. — Jours de solitude (édition posthume).

Discours prononcé par M. René Goblet, ministre de l'instruction publique, des beaux-arts et des cultes, le 11 avril 1885, à la séance de clôture du Congrès des Sociétés savantes à la Sorbonne.

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE FASCICULE XVIII (TOME VII, ANNÉE 1885).

Pages.

Liste des membres de la Société I

I. — Procès-verbaux.

1° Botanique.

Applications taxinomiques de l'*anatomie végétale*, par M. Vuillemin. . . XXXIX
Voyage botanique en *Corse*, par M. Fliche XXXIII
Voyage botanique dans l'*Italie centrale*, par M. Fliche XII
Pied de *Primula prænitens* à fleurs monstrueuses, par M. Le Monnier . XII

2° Chimie.

Chaleur de formation de quelques composés de l'*antimoine*, par M. Guntz. XXX
Influence du milieu sur le sens des réactions; action de la potasse en solution dans l'alcool absolu sur l'*urée* et la *sulfo-urée*, par M. Haller . . XLI
Action de l'ammoniaque sur les *permanganates métalliques*, par M. Klobb. XXXII

3° Géologie.

Corps organisés attribuables à des *Diatomées* dans une plaque mince du silex hornstein du terrain tertiaire d'eau douce de Riedisheim (Haute-Alsace), par M. Bleicher XXIII
Age de la *grouine* dans la vallée de la Meurthe, par M. Bleicher XV

4° Météorologie.

Construction de la *carte météorologique* quotidienne de l'Observatoire de Paris, par M. Millot XXV
Cyclone du 3 juin 1885 à Aden et la perte du *Renard*, par M. Millot . . XL

5° Physique.

Dégagement d'*électricité*, lors du frottement mutuel de la glace et de l'eau à l'état liquide, par M. Blondlot XIV
Loi des tensions de Volta : l'air échauffé à la température du rouge lui obéit et fait partie de la série des tensions formée par les métaux, par M. Blondlot XVII

Pages.

Multiplicateur électrique nouveau, par M. Blondlot XXXVI
Obturateurs instantanés employés en photographie, par M. Dumont. . . XVI
Recherches sur la cristallisation des *paratartrates,* par M. Bichat. . . . XVI
Nouveau modèle de *tourniquet électrique,* par M. Bichat XXX

6° Physiologie.

Contraction simultanée des *muscles antagonistes,* par M. Beaunis . . . XXII
Influence de l'obscurité sur les *fonctions visuelles,* par M. Charpentier . XIX
Influence des *perceptions d'un œil* sur celles de l'autre, par M. Charpentier XX

7° Zoologie.

Vers parasites des poissons, par M. Prenant. XXIV

II. — Mémoires originaux.

Recherches sur les *Formes de la contraction musculaire* et sur les *Phénomènes d'arrêt,* avec tracés, par M. Beaunis 1
Étude critique sur la mécanique, avec figures, par M. Calinon 87
De la *Classification des nuages de Poëy,* avec planches, par M. Millot . 181
Le *Cyclone* du 3 juin 1885 à Aden et la perte du *Renard,* par M. Millot. 197
Recherches sur les *Vers parasites des poissons,* avec planches, par M. Prenant 206

Sociétés correspondantes 233
Liste des publications périodiques, mémoires et ouvrages reçus pendant l'année 1885. 237
Table des matières 241

Nancy, imprimerie Berger-Levrault et Cie.